LA EDAD OSCURA DEL UNIVERSO • VIRUS PARA MOVILES





Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NEURONAS ESPEJO Y AUTISMO

RECUPERACION DE ZONAS MUERTAS

VER CON SUPERCONDUCTORES

SISTEMAS CUASIBIDIMENSIONALES

EL ORIGEN DE LAS CONSTELACIONES GRIEGAS

SISTEMAS PLANETARIOS EXTRASOLARES



ENERO 2007
6,00 EUROS

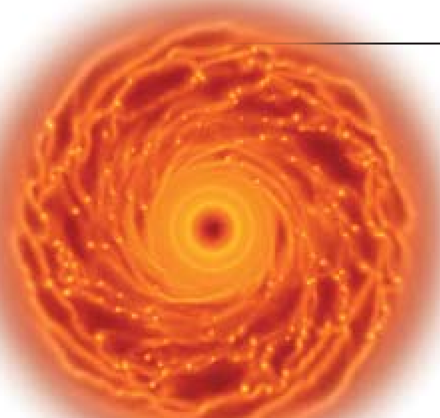
INVESTIGACION y CIENCIA

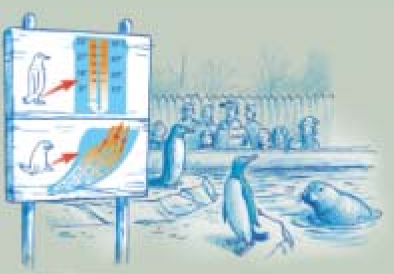
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

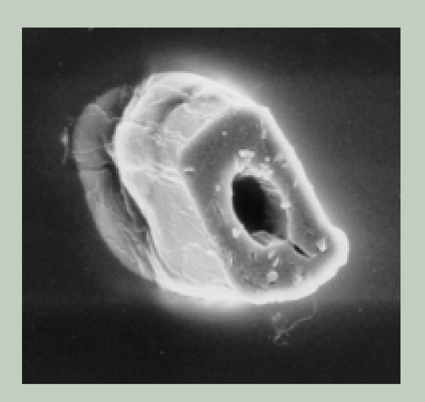
Enero de 2007

Número 364













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero: *La edad oscura del universo* y *Sistemas planetarios extrasolares*; Luis Bou: *Virus para móviles*; Joandomènec Ros: *Recuperación de zonas muertas*; Ramón Pascual: *Ver con superconductores*; I. Nadal: *El origen de las constelaciones griegas*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes, Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Richard Marchand

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

ABURRIMIENTO. «En esta época de semiautomatismos, en que no sólo el personal militar sino también muchos trabajadores fabriles tienen poco en que ocuparse salvo mantenerse atentos a sus máquinas, se agudiza el problema de la conducta humana en situaciones de monotonía. En 1951, el psicólogo de la Universidad de McGill Donald O. Hebb obtuvo una beca del Comité canadiense de Investigación para la Defensa para realizar un estudio sistemático. La exposición prolongada a un entorno monótono produce sin lugar a dudas efectos nocivos. La persona muestra defectos de raciocinio; exhibe reacciones emocionales pueriles; su percepción visual se perturba; padece alucinaciones; cambia el trazado de sus ondas cerebrales.»

ANSIEDAD. «En el último año y medio, la venta con receta de meprobamato, fármaco tranquilizante más conocido como Miltown y Equanil, ha subido hasta la cifra de 32,5 millones de dólares anuales. Se han vendido más de mil millones de píldoras; la producción mensual de 50 millones de toneladas no cubre la demanda. Algunos farmacéuticos de California anuncian en el escaparate cada nueva remesa con banderines de colores que rezan '¡Sí, hoy tenemos Miltown!'»

...cien años

AUTO CHIC. «Al mejor aspecto de los coches de este año contribuye en gran medida el considerable aumento de la distancia entre ejes que, en el caso de algunas de las máquinas más pesadas, supera ya los tres metros. Además, el motor de seis cilindros ha traído consigo el aumento de la longitud del capó, lo cual contribuye también al aspecto general atrevido y elegante de las máquinas más modernas. Prestando una juiciosa atención a esos detalles, incluso los fabricantes de modelos menos potentes y más baratos han conseguido dotar a sus productos de un estilo del que carecían por completo los modelos anteriores.»

VUELO DEPORTIVO Y VUELO MILITAR. «Siendo ya un hecho consumado el vuelo del avión mecánico, podemos observar ahora que el interés se desvía desde el globo dirigible hacia el aeroplano. Su campo de aplicación se encontrará principalmente en los ejércitos, donde resultará inestimable para misiones de reconocimiento y para el envío de despachos rápidos. Con toda probabilidad, el principal desarrollo lo tendrá en el ámbito del deporte, donde podría disfrutar de una popularidad igual a la del automóvil.»

DINERO TÉ. «El monetario es el más raro y curioso de los usos que en Oriente se ha dado al té en tabletas (hojas de té comprimidas en forma de bloque). Circula aún como medio de intercambio en las ciudades chinas más interiores y en los mercados y bazares de Asia central. Entre la ciudad mongola de Urga y la siberiana Kiatka, circula dinero por valor de medio millón de taeles (unos 600.000 dólares). En la última ese dinero deja de emplearse para entrar en el intercambio de tabletas de té habitual en Siberia y Rusia, donde el ejército ruso, los topógrafos, las compañías teatrales ambulantes y los turistas en general lo practican de forma rutinaria.»

...ciento cincuenta años

LA REALIDAD COMO TEATRO. «La tormenta de la tarde del día 13 del mes pasado supuso una dura prueba para la resistencia del puente colgante sobre las cataratas del Niágara, cuando los cobradores del peaje abandonaron sus puestos en ambas entradas y se agolpó una multitud para verlo desplomarse; sin embargo, resistió como una roca.»



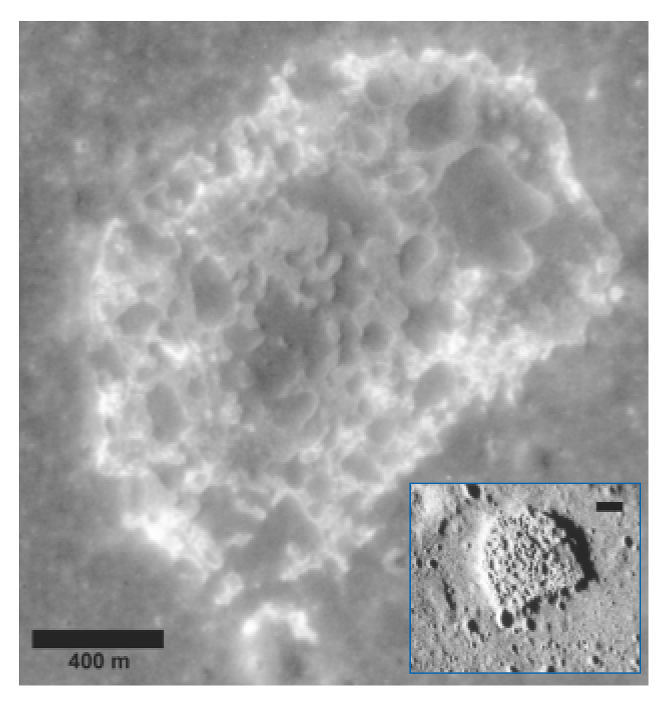


Lo último en automóviles, enero 1907

LOS RELATOS DEL DOCTOR LIVINGSTONE. «El afamado viajero doctor Livingstone ha estado dando conferencias desde su regreso a Inglaterra. Durante su inaudita marcha, solo entre salvajes, para quienes una cara blanca era como un milagro, el doctor Livingstone se vio obligado a luchar contra penalidades indescriptibles. Venció la hostilidad de los nativos gracias a su profundo conocimiento del carácter de los mismos y de la lengua bechuana, que está emparentada con la de aquéllos. Vadeó ríos a pie; durmió en las esponjas y lodos de las ciénagas, a menudo tan empapado que se veía obligado a usar la axila a modo de bolsillo para el reloj. Abundaban los leones, adorados por muchas tribus como receptáculos del alma difunta de sus jefes; pero opina que el miedo a los animales salvajes africanos es mayor en Inglaterra que en Africa.»

ASTRONOMIA

Gas lunar



Ina, estructura de la superficie lunar en forma de D, presenta pocos impactos: debió de remodelarla la actividad volcánica. Las zonas claras son farallones y cascote. Con luz rasante se manifiesta la depresión de Ina (*recuadro*)

La reputación de la Luna de cuerpo frío y quieto pudiera resultar inmerecida. Un nuevo examen de las fotografías tomadas por el Apolo 15 ha puesto de manifiesto, en la formación Ina, elementos del relieve cuya nitidez revela juventud. La escasez de cráteres por impacto de asteroides en el suelo de la estructura nos indica que su edad no supera los 10 millones de años. Los datos espectrales tomados por satélites muestran unas bandas de reflexión minerales en uno de los cráteres de Ina. Con el tiempo se habrían apagado. Parece que, entre hace uno y diez millones de años, se produjo una liberación de gases que expulsó el polvo de la superficie y dejó al descubierto las características juveniles de la formación. Peter Schultz, de la Universidad de Brown, autor del estudio, sostiene que aun cuando haya cesado la actividad volcánica en el astro, sus subproductos continúan llegando a la superficie.

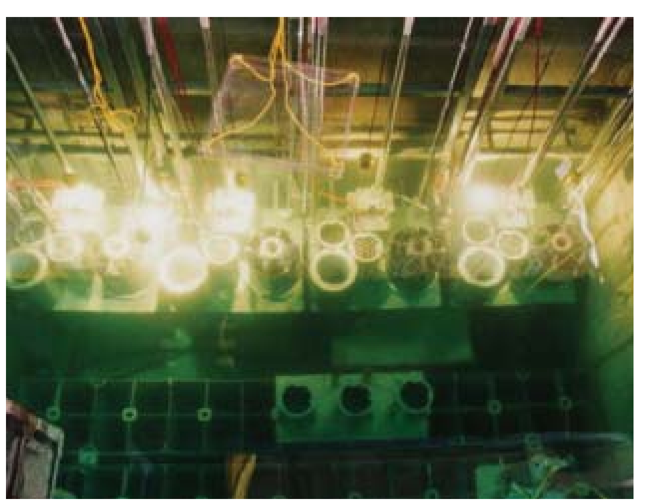
—Nikhil Swaminatham

ARMAMENTO

El ensayo fallido de Corea del Norte

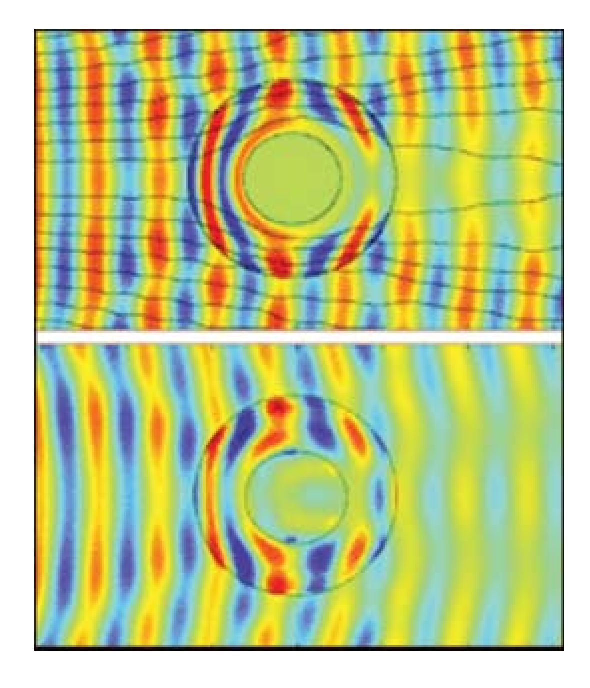
En cuanto Corea del Norte anunció que había efectuado un ensayo nuclear, los expertos percibieron que la explosión había sido mucho menor de lo esperado. En una primera prueba suelen detonarse bombas de entre cinco y veinticinco kilotones. (Corea, al parecer, había dicho a China que la suya sería de cuatro kilotones; veinte fueron los de la primera bomba nuclear de la historia.) Según los cálculos realizados a posteriori, habría explotado sólo un artefacto de medio kilotón. De lo que no cabe duda es de su carácter nuclear. Las muestras de aire recogidas dos días después contenían isótopos radiactivos de xenón. Por esos y otros indicios, se supone que la primera bomba atómica coreana fracasó. Debaten los expertos sobre el material fisible empleado. A tenor de las muestras de aire, debió de ser plutonio, un elemento que Corea del Norte lo posee en abundancia. No consta que haya enriquecido uranio en la medida necesaria para un arma. El plutonio ha de estar rodeado por una combinación de explosivos lentos y rápidos. A ese recubrimiento ha de dársele una forma muy precisa para que genere una onda de choque perfectamente esférica que comprima el plutonio hasta duplicar su densidad, al menos, o incluso quintuplicarla. Tal condición se requiere para que una masa subcrítica de plutonio se convierta en supercrítica (es decir, capaz de sustentar una reacción en cadena). Las desviaciones de la simetría deformarán la carga y el adensamiento será menos eficaz. Puede fallar también el iniciador, un emisor de neutrones que ceba la reacción en cadena y que ha de actuar en el momento preciso. Si, además, el plutonio contiene una proporción excesiva del isótopo 240, que emite muchos más neutrones por segundo que el 239, la sobreabundancia de neutrones producirá una predetonación, que no desarrollará toda la capacidad destructiva de la bomba.

—Graham P. Collins



Las barras de combustible agotadas del reactor de Yongbyon debieron de ser la fuente del plutonio 239 para la explosión nuclear ensayada por Corea del Norte el 9 de octubre de 2006

DE "LUNAR ACTIVITY FROM RECENT GAS RELEASE," POR PETER H. SCHULTZ ET AL., EN *NATURE*, VOL. 444; 9 DE NOVIEMBRE DE 2006 (*superficie lunar*) ;SYONHAP/*AP PHOTO* (*reactor*)



FISICA

Invisible

A los pocos meses de demostrar la viabilidad teórica de la idea, David Schurig y David Smith, de la Universidad Duke, han construido un rudimentario sistema invisibilizador. Se trata de unos anillos concéntricos hechos con un material compuesto. Creado con metal y alambre inmerso en fibra de vidrio se configura de suerte tal, que imparte a la luz propiedades insólitas. Los anillos curvan la radiación de microondas en torno al anillo más interno, como el agua que fluye en torno a una piedra. El anillo central absorbe y refleja las microondas en menor cuantía que lo haría en condiciones normales. Se reducen la reflexión y la sombra generadas por el objeto (en microondas, no en otras frecuencias). Esa doble reducción es la característica esencial de un revestido invisibilizador. Lograrlo ha resultado más sencillo de lo previsto, pero de ahí a una verdadera capacidad de volver invisibles los objetos hay un muy largo trecho.

—J. R. Minkel

Desaparición: Un revestimiento en forma de anillo absorbe las microondas directas (*azul*), produce unas reflexiones débiles (*rojo*) y crea unas sombras mínimas

SENTIDOS

Receptores del dolor

En el veneno de araña se han identificado tres moléculas que podrían servirnos para sondear el comportamiento de los receptores de las neuronas sensoriales en la generación de dolor. Tras inyectar las toxinas purificadas en las extremidades de ratones, se les hincharon las patas y los animales reaccionaron con contracciones y lamiéndolas. Pero, según el estudio publicado en *Nature*, los ratones transgénicos, que no expresaban los receptores, se mostraron indiferentes a la administración de la toxina. Los péptidos aislados de ciertas tarántulas estimulan el mismo receptor que la capsaicina, el componente que hace picantes a los chiles. Pero, a diferencia de la capsaicina, las toxinas de la tarántula estimulan la zona externa de las neuronas sensoriales; valdrían para estudiar las neuronas sin destruirlas.

—Alison Snyder



El veneno de las tarántulas y la sustancia que hace picantes a los chiles estimulan los mismos receptores en las neuronas sensoriales

BIOLOGIA

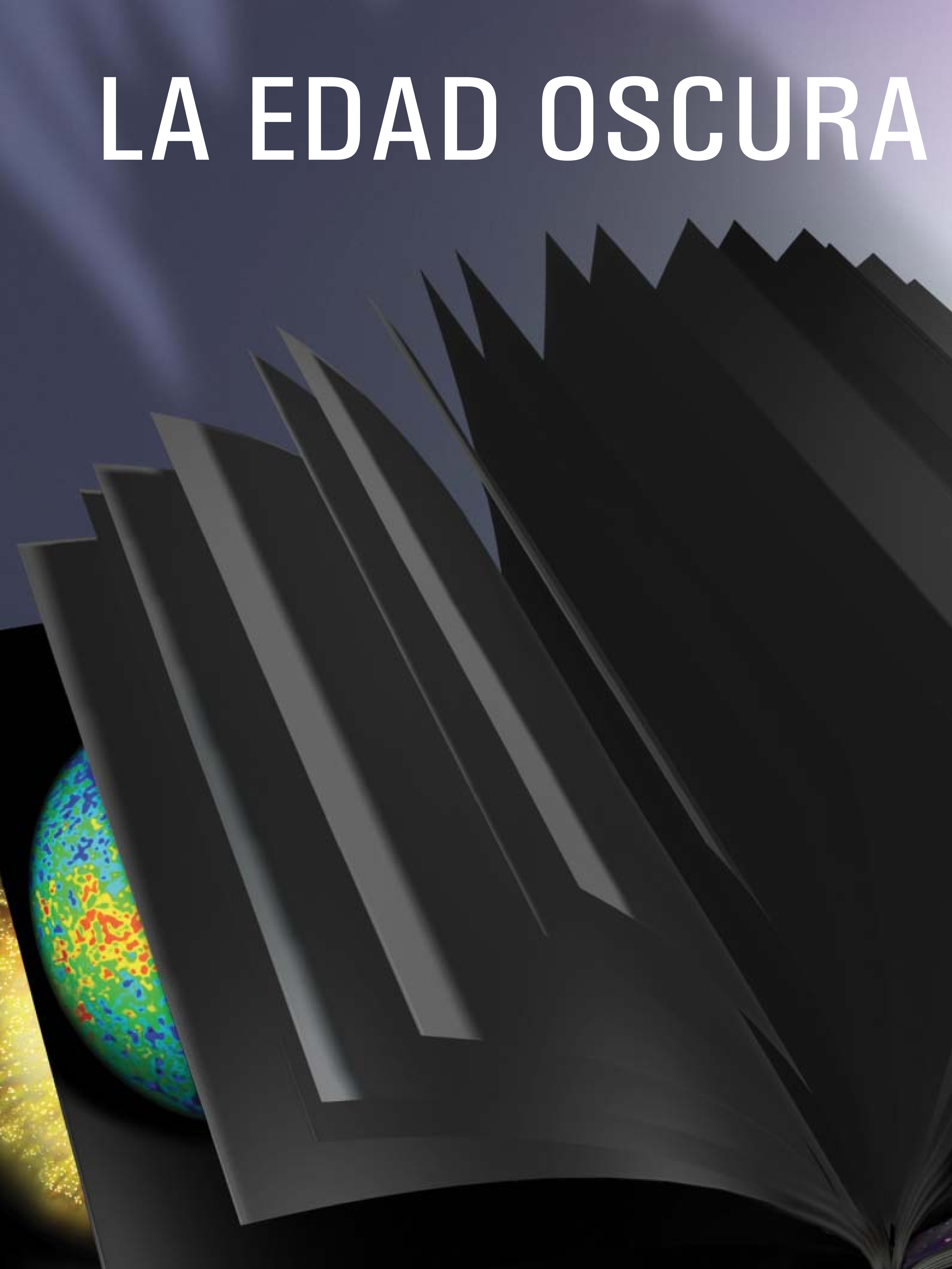
Fría perduración



No un frío invernal, sino unas décimas menos de temperatura corporal alargan la vida de los ratones

Los animales de sangre caliente sometidos a una dieta baja en calorías viven más tiempo, pero también pasan más frío. Basta con rebajar la temperatura corporal de los ratones para alargar su vida. Se ha engañado a los cerebros de ratones transgénicos para que percibiesen una temperatura ambiente excesiva y redujeran su temperatura corporal unas fracciones de grado. Podían entonces consumir cuanto les apeteciera. Los fríos ratones transgénicos vivieron unos tres meses más que los individuos control, una prolongación del orden de un tercio de la aportada por las dietas bajas en calorías. Algunas empresas de biotecnología se han interesado por el desarrollo de un dispositivo inductor de pequeño tamaño que pudiera instalarse en los cerebros de las personas y gobernase la zona neuronal que regula la temperatura del cuerpo.

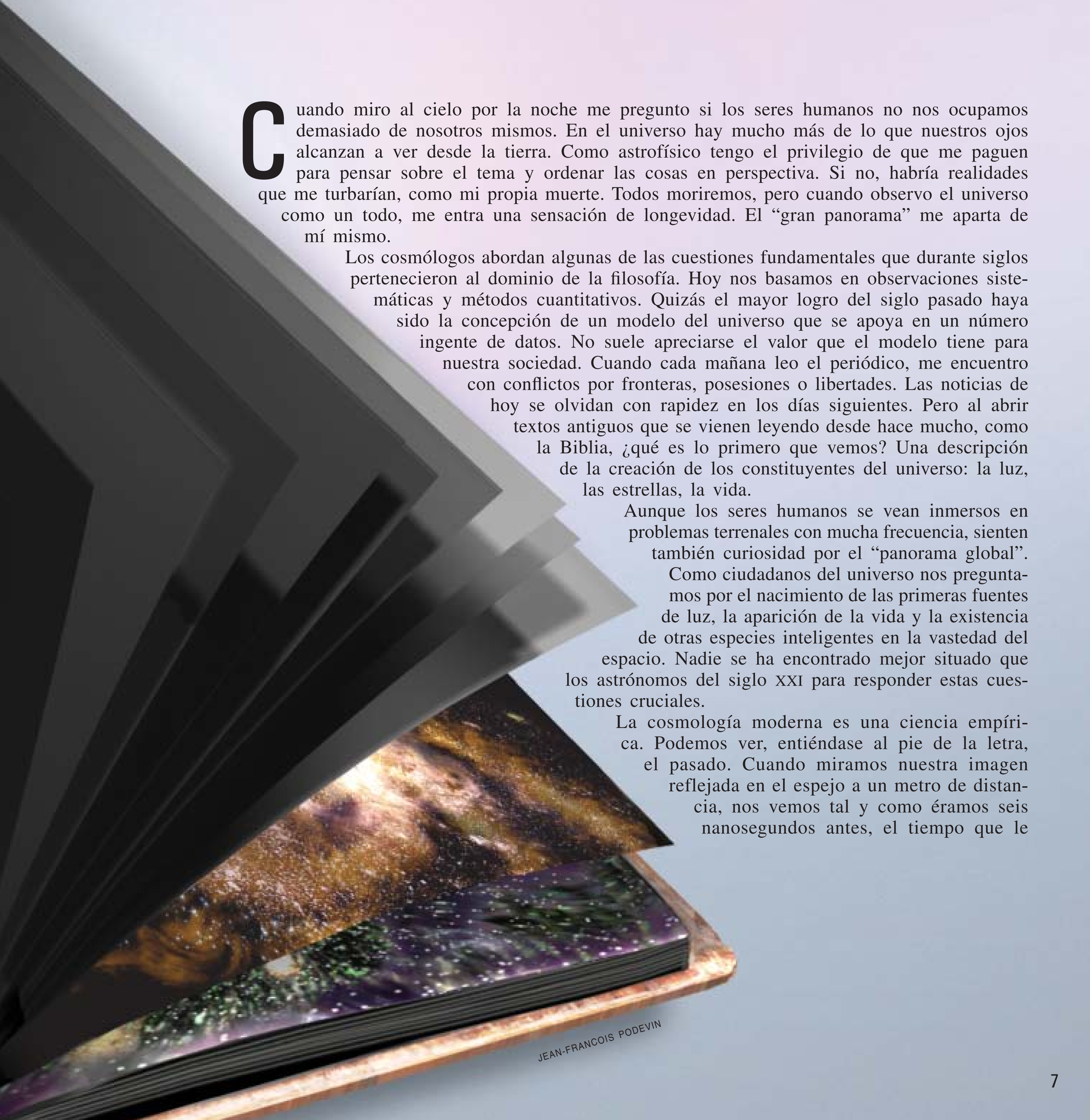
—Nikhil Swaminatham


LA EDAD OSCURA

del universo

Faltan hojas del álbum de imágenes del universo primigenio. Los astrónomos se afanan en encontrarlas

Abraham Loeb



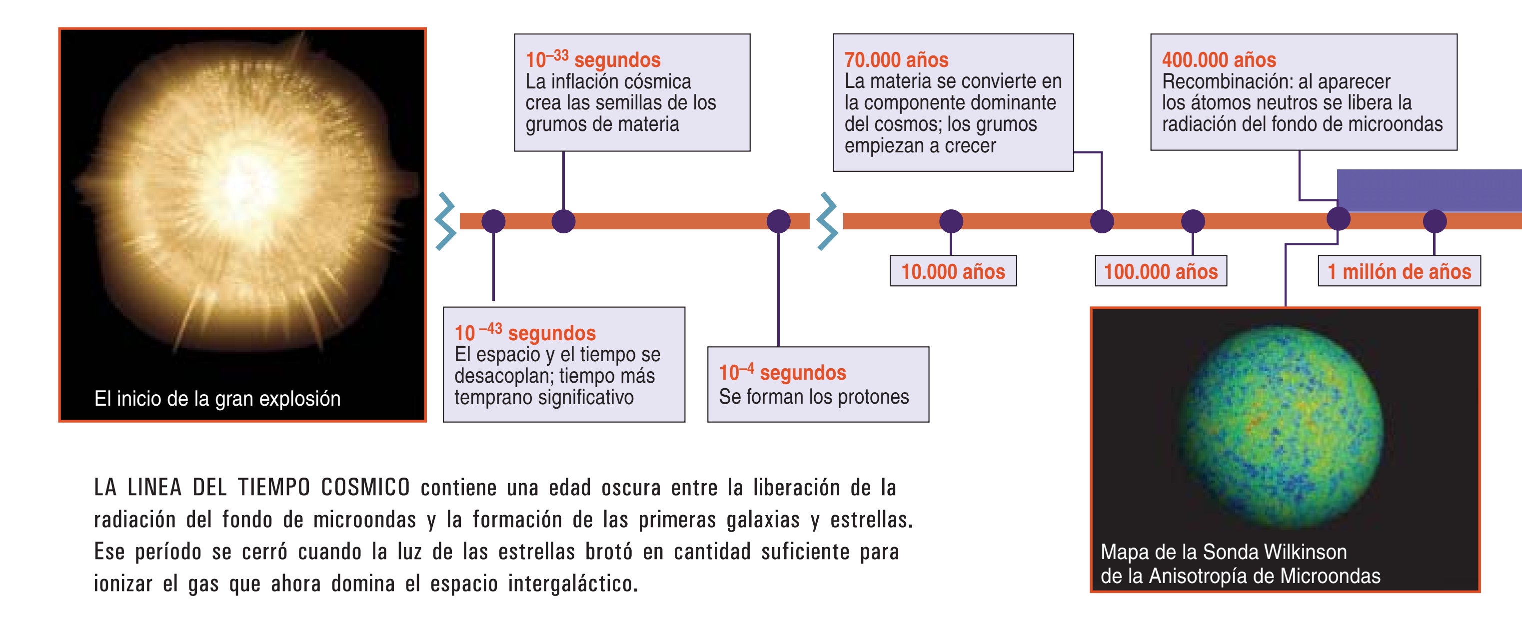
JEAN-FRANCOIS PODEVIN

Cuando miro al cielo por la noche me pregunto si los seres humanos no nos ocupamos demasiado de nosotros mismos. En el universo hay mucho más de lo que nuestros ojos alcanzan a ver desde la tierra. Como astrofísico tengo el privilegio de que me paguen para pensar sobre el tema y ordenar las cosas en perspectiva. Si no, habría realidades que me turbarían, como mi propia muerte. Todos moriremos, pero cuando observo el universo como un todo, me entra una sensación de longevidad. El "gran panorama" me aparta de mí mismo.

Los cosmólogos abordan algunas de las cuestiones fundamentales que durante siglos pertenecieron al dominio de la filosofía. Hoy nos basamos en observaciones sistemáticas y métodos cuantitativos. Quizás el mayor logro del siglo pasado haya sido la concepción de un modelo del universo que se apoya en un número ingente de datos. No suele apreciarse el valor que el modelo tiene para nuestra sociedad. Cuando cada mañana leo el periódico, me encuentro con conflictos por fronteras, posesiones o libertades. Las noticias de hoy se olvidan con rapidez en los días siguientes. Pero al abrir textos antiguos que se vienen leyendo desde hace mucho, como la Biblia, ¿qué es lo primero que vemos? Una descripción de la creación de los constituyentes del universo: la luz, las estrellas, la vida.

Aunque los seres humanos se vean inmersos en problemas terrenales con mucha frecuencia, sienten también curiosidad por el "panorama global". Como ciudadanos del universo nos preguntamos por el nacimiento de las primeras fuentes de luz, la aparición de la vida y la existencia de otras especies inteligentes en la vastedad del espacio. Nadie se ha encontrado mejor situado que los astrónomos del siglo XXI para responder estas cuestiones cruciales.

La cosmología moderna es una ciencia empírica. Podemos ver, entiéndase al pie de la letra, el pasado. Cuando miramos nuestra imagen reflejada en el espejo a un metro de distancia, nos vemos tal y como éramos seis nanosegundos antes, el tiempo que le



LA LINEA DEL TIEMPO COSMICO contiene una edad oscura entre la liberación de la radiación del fondo de microondas y la formación de las primeras galaxias y estrellas. Ese período se cerró cuando la luz de las estrellas brotó en cantidad suficiente para ionizar el gas que ahora domina el espacio intergaláctico.

lleva a la luz ir al espejo y regresar. De igual forma, los cosmólogos no tienen que hacer cábalas sobre la evolución del universo; la contemplan a través de los telescopios. Puesto que todas las direcciones del universo parecen estadísticamente idénticas, lo que apreciamos a una distancia de miles de millones de años-luz es, probablemente, una justa representación de nuestra propia región del espacio tal y como fue hace miles de millones de años.

La cosmología observacional persigue captar la historia completa del universo, una visión ininterrumpida de lo que nos ha precedido, empezando por un gas amorfo de partículas subatómicas. Tenemos una instantánea del universo a los 400.000 años tras la gran explosión: la radiación del fondo cósmico de microondas. Mil millones de años más tarde, contamos ya con imágenes de galaxias. A mediados de la próxima década, la NASA lanzará el Telescopio Espacial James Webb. Este ingenio estará capacitado para observar las primeras galaxias, que, según predicen los teóricos, se generaron cuando el universo tenía unos cientos de millones de años.

Queda, pues, un gran hueco. Entre la emisión del fondo de microondas y los primeros rayos de luz estelar hubo un período en el que el universo era oscuro y el fondo de microondas no llevaba ya inscrita la distribución de materia. Parecerá una época sombría y letárgica, un intermedio aburrido entre las secuelas inmediatas de la gran explosión y el bullicioso cosmos de hoy día. Sin embargo, algo fundamental sucedió en esa edad oscura: la sopa primordial evolucionó hasta convertirse en el zoo variopinto de cuerpos celestes que hoy observamos. En la oscuridad, las fuerzas gravitatorias ensamblaron los objetos del cosmos.

La situación que se les presenta a los astrónomos recuerda al álbum de fotos que pasara de las primeras imágenes en ultrasonido de un feto a las fotografías de su adolescencia y madurez. Si se intenta averiguar a partir de las fotografías lo acontecido entre ambas fases, se podría incurrir en grandes errores. Un niño no es un feto a mayor escala, ni un adulto a menor escala. Lo mismo sucede con las galaxias. No siguieron un desarrollo lineal a partir de los grumos incipientes de materia perceptibles en el fondo de microondas. Las observaciones nos hablan de una transición compleja la experimentada por el universo durante la edad oscura.

Los astrónomos buscan ahora las páginas perdidas del álbum fotográfico cósmico, que corresponden a la evolución del universo durante su infancia y a la formación de los constituyentes de las galaxias, entre ellas la Vía Láctea. Hace unos diez años, cuando empecé a trabajar en este campo, había muy pocos interesados. La cuestión concita en estos días la mayoría de los proyectos de futuras observaciones y promete convertirse en una de las fronteras de la cosmología más apasionantes.

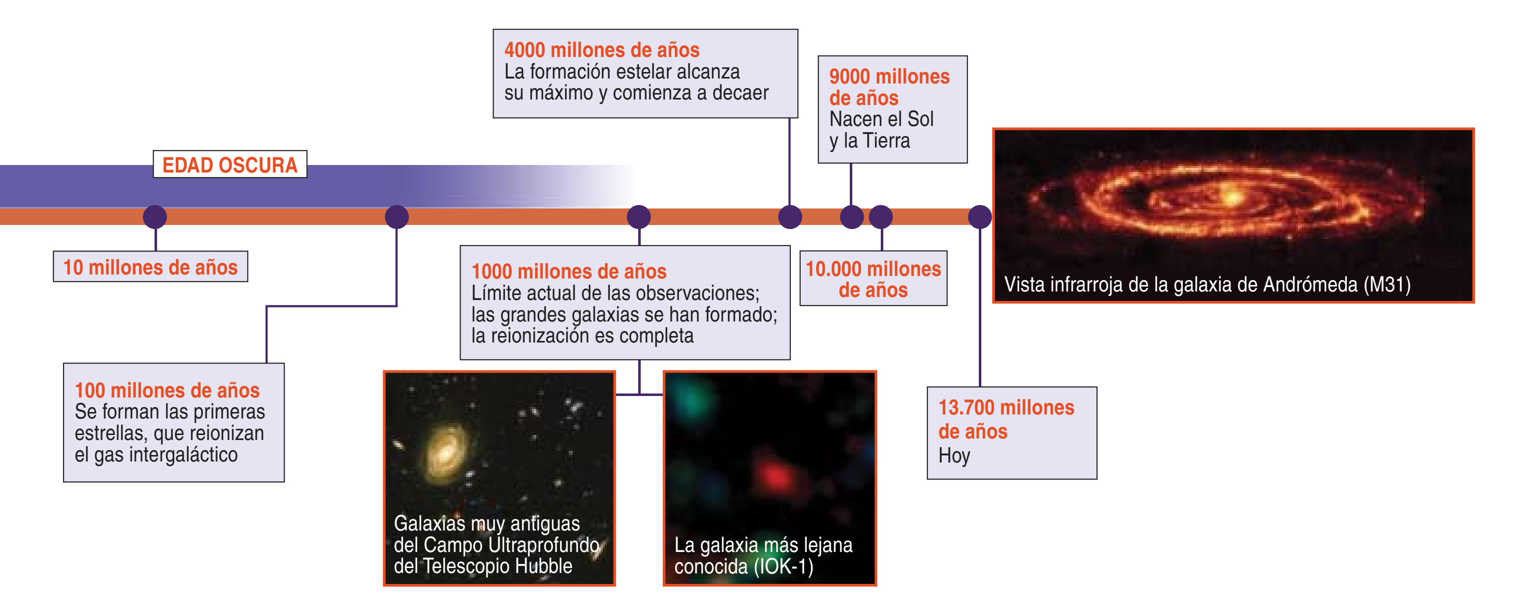
De los iones a los iones

De acuerdo con la teoría de la gran explosión, el universo temprano estaba lleno de plasma caliente: una sopa de protones, electrones y fotones, espolvoreada con otras partículas. Los electrones en movimiento libre interac-

Resumen/La época de la reionización

- En los últimos decenios los cosmólogos han venido prestando atención a la radiación del fondo cósmico de microondas, una visión del universo a la edad de 400.000 años. Pero entre ese momento y la aparición de las primeras galaxias transcurrió un período de casi total oscuridad, apenas rota por débiles emisiones. Las sombras de esa era celan los secretos de la formación de las galaxias.
- Es manifiesta la dificultad de examinar un período que, por su propia naturaleza, resulta poco menos que invisible. Hay que dar con las débiles ondas de radio que el gas de hidrógeno eléctricamente neutro emitía durante su interacción con la radiación del fondo. Se acaba de iniciar la búsqueda.
- El mapa resultante adquirirá un interés harto mayor que el mismo fondo de microondas. Será tridimensional y mostrará, paso a paso la aparición de estructuras a partir de lo amorfo.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN *(izquierda)*; MAX TEGMARK *Instituto de Tecnología de Massachusetts (derecha)*



Galaxias muy antiguas del Campo Ultraprofundo del Telescopio Hubble

La galaxia más lejana conocida (IOK-1)

Vista infrarroja de la galaxia de Andrómeda (M31)

NASA, AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, STEVEN BECKWITH *Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial* Y EQUIPO DEL CAMPO ULTRAPROFUNDO DEL TELESCOPIO HUBBLE (*antiguas galaxias*); M. IYE Y K. OTA, ©SUBARU TELESCOPE, OBSERVATORIO ASTRONOMICO NACIONAL DE JAPON (*IOK-1*); NASA/JPL (*M31*)

tuaban con los fotones mediante la dispersión Thomson, que acopla apretadamente materia y radiación. A medida que el universo se expandía, se fue enfriando. Cuando la temperatura cayó a unos 3000 kelvin, los protones y los electrones se combinaron y formaron átomos eléctricamente neutros de hidrógeno.

Terminó el proceso de dispersión Thomson. Los fotones dejaron de interactuar con la materia de forma tan intensa y se convirtieron en el fondo de microondas. La expansión cósmica siguió enfriando el gas: cabría esperar que el gas cósmico apareciera frío y neutro hoy día. Pero no hubo tal.

Aunque el mundo que nos rodea consta de átomos, la inmensa mayoría de la materia común del universo actual se encuentra en forma de plasma y se sitúa en el espacio intergaláctico. Los espectros observados de los cuásares, las galaxias y las explosiones de rayos gamma más lejanos (y, por ende, más viejos) indican que el hidrógeno cósmico difuso estaba completamente ionizado a la edad cósmica de mil millones de años [*véase* "Vacíos espaciales", por Evan Scannapieco, Patrick Petitjean y Tom Broadhurst; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2002]. Una pista tentadora acerca de qué pudo ocurrir se halló hace tres años, cuando la sonda Wilkinson para el Estudio de las Anisotropías de las Microondas (WMAP) confirmó que la radiación del fondo de microondas se halla ligeramente polarizada. El hidrógeno neutro no polariza esta radiación; sólo el hidrógeno ionizado puede hacerlo. La cantidad de polarización sugiere que el gas se ionizó muy temprano, unos pocos cientos de millones de años tras la gran explosión. Por tanto, los átomos debieron de fragmentarse de nuevo en protones y electrones al término de la edad oscura.

Acostumbra asociarse esa reionización a las primeras generaciones de estrellas. Para ionizar un átomo de hidrógeno se requiere una energía de 13,6 electronvolt, cuantía aportada por los fotones de la luz ultravioleta. No se trata de ninguna cantidad desorbitada de energía. Equivale a unos 10^9 joule por kilogramo de hidrógeno, mucho menos que los 10^{15} joule liberados por la fusión nuclear de la misma masa de hidrógeno. Bastaría que una millonésima parte del gas del universo experimentase la fusión en el interior de las estrellas, para que se generase la energía requerida en la ionización del gas restante.

Otros conjeturan que el material que caía a los agujeros negros fue el origen de la radiación ionizante. La caída hacia un agujero negro libera unos 10^{16} joule por kilogramo; bastaría que cayese una diezmillonésima parte del hidrógeno cósmico en los agujeros negros para ionizar el resto del gas.

Estrellas y agujeros negros se crean dentro de las galaxias, galaxias que debieron constituirse antes de que se produjera la reionización. Suele pensarse que las galaxias no son más que meros conjuntos de estrellas. Para un cosmólogo, en cambio, se trata de aglomeraciones enormes de materia donde las estrellas aparecieron tarde. Las galaxias están formadas sobre todo por materia oscura, un tipo de materia sin identificar caracterizado por su invisibilidad intrínseca. Se cree que una galaxia empezaba a constituirse cuando una región del universo de mayor densidad que la media colapsaba por efecto de su propia gravedad. Aunque en un principio esa región se expandía con el resto del universo, el exceso de gravedad frenaba la expansión e invertía su curso. La región se desplomaba sobre sí misma para crear un objeto ligado: una galaxia.

De acuerdo con los modelos actuales, las galaxias enanas comenzaron a configurarse cuando el universo tenía 100 millones de años. Con el tiempo se fusionaron unas con otras, dando lugar a galaxias de mayor tamaño. Una galaxia moderna, la propia Vía Láctea, es el resultado de la coalescencia de un millón de esos ladrillos. Dentro de las galaxias embrionarias, el gas se enfriaba y fragmentaba para crear estrellas [*véase* "Estrellas primigenias", por Richard B. Larson y Volker Bromm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2002]. La radiación ultravioleta de las estrellas se filtraba al espacio intergaláctico, separaba los electrones de sus átomos y creaba burbujas expansivas de gas ionizado. Cuantas más galaxias se formaban, más burbujas aparecían; el gas intergaláctico se fue asemejando a un queso

de Gruyère. Las burbujas fueron solapándose y con el tiempo cubrieron el espacio entero.

A pesar de que esta secuencia resulta verosímil, hasta ahora sólo consta en la mente de los teóricos. A los cosmólogos experimentales les gustaría tener pruebas directas de la época de la reionización antes de añadir este capítulo perdido a los libros de texto. Es más, sólo las observaciones pueden establecer si fueron las estrellas o los agujeros negros los causantes de la reionización y qué propiedades tenía la materia oscura. Pero, ¿cómo se observa, si, al menos inicialmente, la edad oscura hacía honor a su nombre?

Viendo en la oscuridad

Por fortuna, incluso el hidrógeno frío emite luz. Las partículas subatómicas presentan una orientación intrínseca, el "espín", que apunta a una de dos direcciones posibles, denominadas convencionalmente "arriba" y "abajo". El protón y el electrón de un átomo de hidrógeno pueden apuntar en la misma dirección (alineación) o en sentidos opuestos. En este último estado, el átomo presenta una menor energía. Si, por ejemplo, tanto el electrón como el protón apuntan hacia arriba y el electrón pasa a apuntar hacia abajo, el nuevo estado atómico habrá perdido energía y cederá un fotón con una longitud de onda de 21 centímetros. A la inversa, si el átomo absorbe un fotón de esta frecuencia, el electrón volverá a tener el espín hacia arriba.

Un fotón de 21 centímetros es mucho menos energético que los fotones que emite el hidrógeno cuando los electrones saltan de una órbita a otra: podía darse el cambio de espín incluso sin la existencia de estrellas que brillaran. La energía de la radiación del fondo cósmico de microondas y de las colisiones entre átomos bastaba para cambiar el espín de los electrones e inducir un brillo tenue del hidrógeno. El número relativo de átomos con espines paralelos y antiparalelos define la temperatura de espín del gas. Una temperatura de espín alta, por ejemplo, indica que una fracción importante de los átomos porta espines que apuntan en la misma dirección.

La teoría mantiene, por tanto, que la edad oscura viene descrita por tres temperaturas distintas: la temperatura de espín (una medida de la abundancia relativa de átomos con diferentes estados de espín), la temperatura cinética común (una medida de los movimientos de los átomos) y la temperatura de radiación (una medida de la energía de los fotones del fondo). Estas tres temperaturas podrían ser distintas entre sí, dependiendo de los mecanismos físicos que primen.

En un peculiar juego de tres, la temperatura de espín fue primero igual a la temperatura cinética, después a la temperatura de radiación y, finalmente, otra vez a la temperatura cinética. Con la expansión del espacio, lo mismo el gas que la radiación se fueron enfriando. Por sus propios medios el gas se hubiera enfriado más deprisa, pero un pequeño número de electrones libres, el residuo que quedó tras la formación de los átomos de hidrógeno, contrarrestó la tendencia. Los electrones actuaban como intermediarios en la transmisión de energía del fondo de microondas a los átomos e igualaban las tres temperaturas. A los diez millones de años de la gran explosión, sin embargo, los electrones dejaron de desempeñar ese papel porque el fondo de microondas se había diluido. Se rompió el equilibrio entre gas y radiación. El gas inició un proceso de rápido enfriamiento. Las colisiones atómicas mantuvieron igualadas las temperaturas cinética y de espín. En esta fase, el hidrógeno era un absorbente neto de fotones de 21 centímetros. Extraía energía del fondo de microondas (aunque nunca en la cuantía necesaria para restablecer el equilibrio).

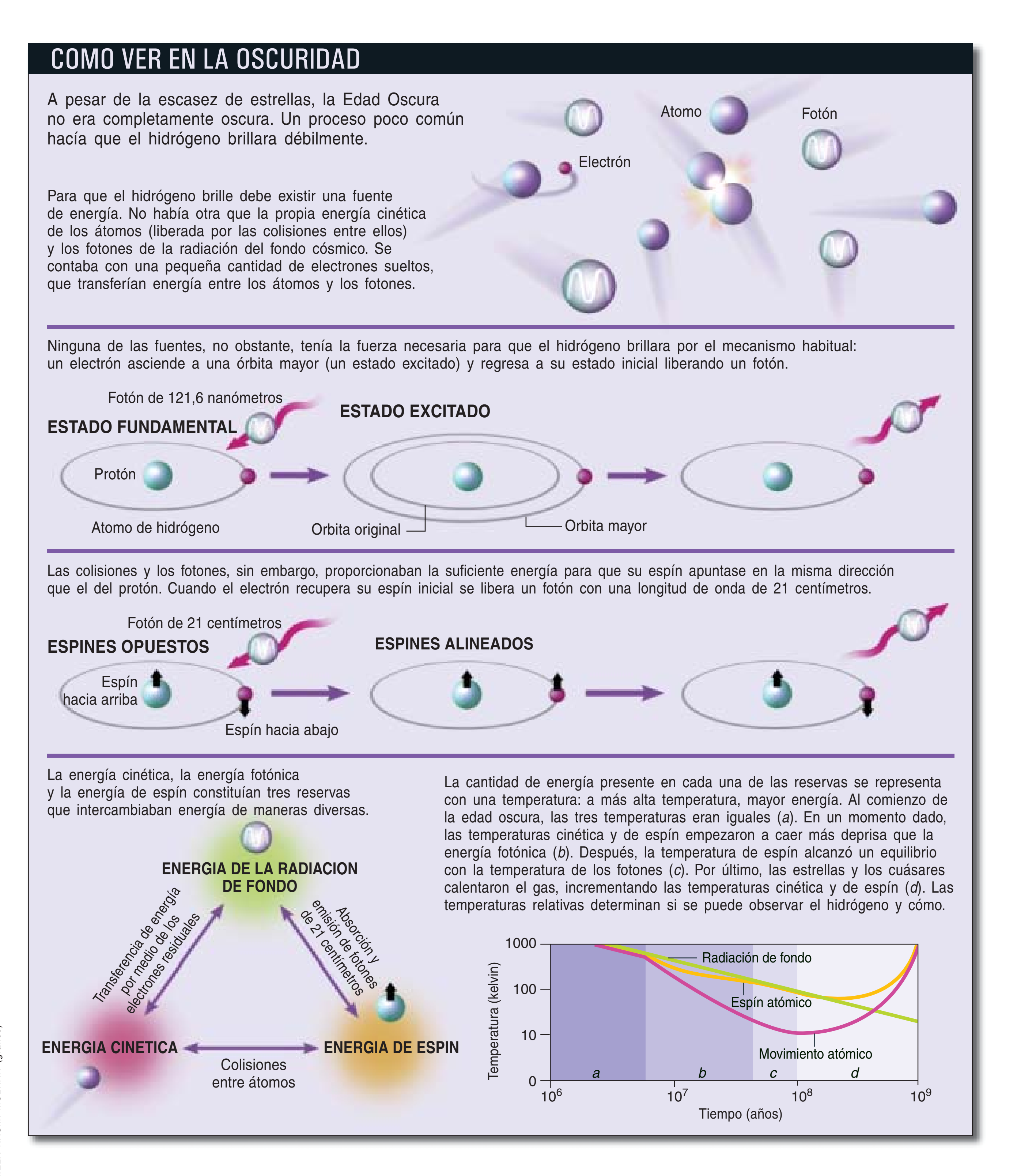
Cien millones de años después de la gran explosión, hubo una segunda transición. La expansión cósmica había enrarecido la densidad del gas hasta el punto de que las colisiones eran ya demasiado infrecuentes para que lograran igualar las temperaturas cinética y de espín. Los espines drenaban energía del fondo de microondas. Cuando la temperatura de espín alcanzó el equilibrio con la temperatura de radiación, el hidrógeno había dejado de ser absorbente y emisor neto de fotones de 21 centímetros. Durante ese período, el gas resultaba indistinguible del fondo de microondas.

Al encenderse las primeras estrellas y agujeros negros, sobrevino una tercera transición. Los rayos X aumentaron la temperatura cinética. El hidrógeno absorbía y reemitía la luz ultravioleta; el consiguiente trasiego de electrones de órbita a órbita derivó en un equilibrio entre las temperaturas cinética y de espín. La temperatura de espín aumentó por encima de la temperatura del fondo de microondas, por lo que el hidrógeno empezó a brillar más que el fondo. El cambio de espín de los electrones requiere menos energía que la ionización, así que las galaxias hicieron que el hidrógeno brillara incluso antes de que lo reionizasen. Con el tiempo, cuando el hidrógeno alcanzó de nuevo el estado ionizado, brillaría a través de otros procesos y se debilitaría la emisión intergaláctica de 21 centímetros.

Tomografía primigenia

Debido a este juego de tres, el cielo de 21 centímetros será más brillante o más oscuro que el fondo de microondas en razón del momento y del lugar. Otro fenómeno a considerar es la dilatación de la longitud de onda de los fotones en virtud de la expansión del universo. Desde el inicio de la edad oscura, el tamaño del universo se ha multiplicado por mil: un fotón de 21 centímetros emitido entonces llega hoy a la Tierra con una longitud de onda de 210 metros; un fotón emitido hacia el final de la época oscura tendría una longitud de onda de uno o dos metros.

Este rango de longitudes cae dentro del intervalo de radio del espectro electromagnético. Se pueden recoger esas emisiones con una batería de antenas de baja frecuencia, parecidas a las que se utilizan para las comunicaciones por radio y televisión. Varios grupos están construyendo conjuntos así. La Red de Campo Ancho de Mileura (MWA), en el oeste de Australia, tendrá 8000 antenas esparcidas por una zona de kilómetro y medio de largo. Detectará longitudes de onda de 1 a 3,7 metros, con una resolución angular de minutos de arco, correspondientes durante la edad oscura a una escala física de unos tres millones de años-luz. Otras baterías de antenas son la Red de Bajas Frecuencias (LOFAR), el Telescopio de Estructuras Primigenias (PaST) y, en un futuro más lejano, la Red del Kilómetro Cuadrado (SKA).



GEORGE RETSECK (*ilustraciones*); DANIELA NAOMI MOLNAR (*gráfico*)

Al rastrear distintas longitudes de onda, estos instrumentos examinarán la emisión de 21 centímetros en momentos diferentes de la historia del cosmos. Con sus datos se levantará un mapa tridimensional de la distribución del hidrógeno neutro. Se observará el crecimiento de fluctuaciones de densidad de una parte en 100.000 (las registradas en el fondo de microondas) hasta que fueron varios órdenes de magnitud mayores. En los lugares de mayor densidad aparecerán galaxias y las burbujas de hidrógeno ionizado que crean. Las burbujas proliferarán y se irán fusionando; con el tiempo limpiarán el espacio intergaláctico de hidrógeno neutro.

La nitidez de las fronteras de las burbujas revelará si la reionización se debió a estrellas de gran masa o a agujeros negros. De las estrellas masivas mana sobre todo energía en forma de luz ultravioleta, mientras que los agujeros negros generan más rayos X, que penetran

hasta mayores profundidades en el gas y producen, pues, fronteras menos definidas.

Por varias razones, el mapa de 21 centímetros contendrá seguramente más información que cualquier otra cartografía cosmológica, más incluso que el fondo cósmico de microondas. En primer lugar, las imágenes del fondo de microondas son bidimensionales, ya que se crearon en un momento único en el tiempo (cuando el universo se enfrió por debajo de 3000 kelvin). En cambio, el mapa de 21 centímetros, tal y como se ha explicado antes, será tridimensional.

En segundo lugar, el fondo de microondas resulta algo borroso, puesto que su liberación no sucedió en todos los puntos exactamente al mismo tiempo; el universo atravesó un período en el que no era ni totalmente transparente ni totalmente opaco, como la niebla que se disipa poco a poco. Durante ese tiempo, la radiación se difundió en distancias cortas, emborronando las impresiones más finas del fondo de microondas. Por el contrario, la radiación de 21 centímetros surgió de los átomos de hidrógeno y no tropezó con nada que se interpusiese en su propagación a través del espacio; por eso, traza la distribución del gas sin emborronarla.

En tercer lugar, el fondo de microondas lleva información de las fluctuaciones de la densidad de la materia que serían semilla de galaxias, mientras que el mapa de 21 centímetros mostrará por igual las semillas galácticas que el efecto de las galaxias ya formadas en sus alrededores.

Para detectar la señal de 21 centímetros habrá que superar numerosas dificultades. Habrá que filtrar las emisiones de radio de baja frecuencia terrestres. Costará aún más vérselas con la radioemisión de fondo de nuestra galaxia, diez mil veces más intensa que la señal de la época de reionización. Por fortuna, el ruido galáctico es más o menos igual a longitudes de onda algo diferentes, mientras que la señal primigenia fluctúa con la longitud de onda, en concordancia con la estructura espacial de las burbujas ionizadas. Tal diferencia permite la extracción de la señal. Los astrónomos podrán comparar los mapas de 21 centímetros con las imágenes de los telescopios de infrarrojos, como el James Webb. Las galaxias que se observen en luz infrarroja deberían correlacionarse con las burbujas ionizadas del hidrógeno neutro.

Aparte de los retos observacionales, corresponderá a los teóricos acometer numerosas tareas pendientes. Sobre todo, tendrán que ejecutar grandes simulaciones por computador de lo que fue sucediendo en un volumen suficiente de espacio (en torno a unos mil millones de años-luz) para que valga de muestra estadísticamente representativa de nuestro universo. Deberán hacerlo con una resolución que permita representar a las galaxias enanas. La simulación habrá de describir la propagación de la radiación ionizadora de las galaxias a través del gas circundante, proceso que hasta ahora se ha recogido muy vagamente en los modelos. Es posible que los observadores vean la reionización antes de que los teóricos hayan predicho qué debería verse.

La conjunción de los esfuerzos teóricos y del empeño de los observadores arrojará luz sobre las incertidumbres que hoy abundan en la teoría de la formación de las galaxias. Algunas dudas conciernen a los grandes agujeros negros de los centros galácticos. A lo largo de los últimos diez años, se ha comprobado que casi todas las galaxias actuales, incluida la Vía Láctea, albergan un agujero negro de masa elevada. Se cree que estos objetos se alimentan con gas esporádicamente; tales episodios se gestarían en una fusión de galaxias. Durante esas fases de crecimiento, el gas que cae al agujero brilla mucho más intensamente que el resto de la galaxia: se forma un cuásar. El Estudio Digital Sloan de los Cielos ha descubierto que a la edad cósmica de mil millones de años ya existían cuásares con agujeros negros de más de mil millones de masas solares. ¿Cómo se formaron agujeros negros tan pronto y tan grandes? ¿Por qué dejaron de crecer?

Otras preguntas guardan relación con la distribución de tamaños de las galaxias. Los teóricos piensan que

LA LUZ DEL COSMOS

En el comienzo de la edad oscura, el gas de hidrógeno eléctricamente neutro llenaba el universo. A medida que se fueron formando estrellas, éstas ionizaron las regiones de sus inmediaciones, creando burbujas por doquier. Con el tiempo, las burbujas se fusionaron entre sí y el gas intergaláctico quedó completamente ionizado.



Tiempo:
Ancho de la imagen:
Longitud de onda observada:

Estas imágenes simuladas de la radiación de 21 centímetros muestran la conversión del hidrógeno en un cúmulo de galaxias. La cantidad de radiación (*la radiación más intensa es blanca, naranja y roja la intermedia, negra la más débil*) refleja la densidad del gas y su grado de ionización. El gas denso y eléctricamente neutro aparece en blanco; el gas denso ionizado, en negro. Se ha modificado la escala de las imágenes para eliminar el efecto de la expansión cósmica, de modo que se perciba mejor la formación de cúmulos. Por la expansión, la radiación de 21 centímetros se observa hoy a mayores longitudes de onda; cuanto más precoz es la imagen, mayor es la longitud de onda actual.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN (*ilustración*); STEVEN FURLANETTO, AARON SOKASIAN Y LARS HERNQUIST *Universidad de Harvard* (*simulación*)

210 millones de años
2,4 millones de años-luz
4,1 metros

Sólo hay gas neutro. Las áreas en blanco son las más densas; darán lugar a las primeras estrellas y cuásares.

290 millones de años
3,0 millones de años-luz
3,3 metros

Los puntos débiles en rojo revelan que las estrellas y los cuásares han empezado a ionizar el gas circundante.

370 millones de años
3,6 millones de años-luz
2,8 metros

Crecen las burbujas de gas ionizado.

460 millones de años
4,1 millones de años-luz
2,4 metros

Se crean nuevan estrellas y cuásares, con sus respectivas burbujas.

540 millones de años
4,6 millones de años-luz
2,1 metros

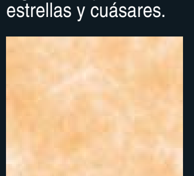
Las burbujas empiezan a interconectarse.

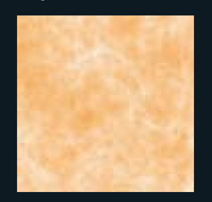
620 millones de años
5,0 millones de años-luz
2,0 metros

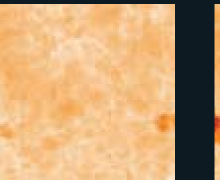
Las burbujas se han fusionado y cubren casi todo el espacio.

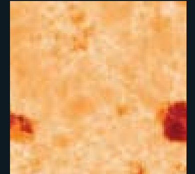
710 millones de años
5,5 millones de años-luz
1,8 metros

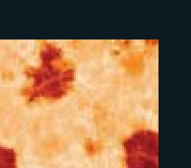
El único hidrógeno neutro sobrante se concentra en las galaxias.

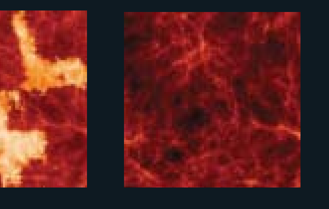












la radiación ultravioleta de las galaxias enanas calentó el gas cósmico durante la reionización y suprimió la formación de nuevas galaxias pequeñas. ¿Por qué se ha prolongado esa supresión a lo largo del tiempo? De las galaxias enanas que encontramos hoy, ¿cuáles existían ya al principio? No son sino un par de muestras de los muchos interrogantes cuyas respuestas se ocultan en la edad oscura.

El autor

Abraham Loeb es uno de los más destacados expertos del estudio teórico de las estrellas y agujeros negros de la época de reionización. Le mueven las cuestiones clásicas de la filosofía. En busca de respuesta estudió física. Enseña astronomía en la Universidad de Harvard y es profesor visitante del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, Israel. También ha sido un pionero de la detección de planetas extrasolares mediante la técnica de la microlente gravitatoria y del estudio de la generación de rayos gamma en el espacio intergaláctico.

Bibliografía complementaria

FIRST LIGHT. Abraham Loeb. Apuntes de la presentación para la Escuela de Invierno de SAAS-Fee, abril 2006.

CHASING HUBBLE'S SHADOWS: THE SEARCH FOR GALAXIES AT THE EDGE OF TIME. Jeff Kanipe. Hill y Wang, 2006.

COSMOLOGY AT LOW FREQUENCIES: THE 21 CM TRANSITION AND THE HIGH-REDSHIFT UNIVERSE. Steven Furlanetto, S. Peng Oh y Frank Briggs en *Physics Reports*, volumen 433, números 4-6, págs. 181-301, octubre de 2006.

NEURONAS ESPEJO

Un tipo especial de células cerebrales reflejan el mundo exterior. Vehiculan nuestra capacidad de imitar, aprender y comprender las acciones e intenciones ajenas

Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi y Vittorio Gallese

Una escena breve: Pablo mira cómo Elena corta una flor. Pablo sabe qué está haciendo Elena (cortar la flor) y sabe también por qué lo hace. Elena le sonríe; Pablo adivina que se la va a regalar. Su percepción de lo que está sucediendo es casi instantánea. Pero, ¿de qué modo consigue comprender la acción y los propósitos de Elena con tanta facilidad?

Un decenio atrás, psicólogos y neurocientíficos habrían atribuido ese conocimiento de las acciones de otro individuo y, sobre todo, sus intenciones a un proceso de razonamiento, no muy distinto del que se sigue en la resolución de un problema lógico: un refinado aparato cognitivo en el cerebro de Pablo procesaría la información que le proporcionan sus sentidos y la compararía con experiencias similares (almacenadas con anterioridad), llegando a una conclusión sobre lo que va a hacer Elena y los motivos que la animan.

Aunque ciertas situaciones sí den origen a deducciones complejas, sobre todo a la hora de analizar conductas extrañas, la facilidad y prontitud con que solemos comprender acciones simples sugiere un mecanismo mucho más sencillo. A comienzos de los años noventa, nuestro grupo de investigación de la Universidad de Parma, que contaba entonces con Luciano Fadiga, halló, de forma casual, la respuesta en una clase sorprendente de neuronas en el cerebro de un mono. Tales células nerviosas se excitan cuando el individuo ejecuta simples acciones motoras dirigidas a un fin, por ejemplo, agarrar una fruta. Lo reseñable es que se excitan también esas neuronas cuando el sujeto ve a alguien realizar la misma operación. Estas células cerebrales recién descubiertas parecían reflejar en el cerebro del observador las acciones realizadas por otro. Por eso se las denominó neuronas espejo.

A semejanza de los circuitos neuronales que almacenan recuerdos específicos, estos conjuntos de neuronas espejo parecen codificar patrones o moldes de acciones específicas. Tal propiedad permitiría no sólo realizar movimientos básicos que no sean fruto de reflexión alguna sino, además, comprender sin necesidad de razonamientos esos mismos actos observados

1. LA ACCION QUE REALIZA una persona excita vías motoras en el cerebro de otra persona, responsables de ejecutar la misma acción. La segunda comprende de un modo visceral lo que está haciendo la primera porque, merced al mecanismo especular, experimenta la acción en su propio cerebro.

CARY WOLINSKY (*fotografía*); JEN CHRISTIANSEN (*fotomontaje*)



en otra persona. Pablo capta la acción de Elena porque, aun cuando el acto suceda ante sus ojos, se desarrolla también en el interior de su cerebro. Según la antigua tradición fenomenológica de la filosofía, para comprender verdaderamente algo había que experimentarlo dentro de uno mismo. Para los neurocientíficos, sin embargo, el hallazgo de una base física de esa idea en el sistema neuronal especular significa un cambio radical en nuestra comprensión del modo de entender la realidad.

Reconocimiento instantáneo

Cuando descubrimos las neuronas espejo no nos proponíamos defender o combatir tradiciones filosóficas. Estudiábamos la corteza motora, en concreto el área F5, asociada a los movimientos de la mano y la boca, para averiguar de qué modo los patrones de activación neuronal codifican las instrucciones para la realización de ciertas acciones. Registrábamos la actividad de distintas neuronas en el cerebro de macacos. En el laboratorio había numerosos estímulos para ellos. Y mientras desarrollaban la acción de respuesta (agarrar un juguete o una porción de comida, por ejemplo), observábamos la excitación de conjuntos de neuronas mientras acometían acciones motoras específicas.

Advertimos entonces algo extraño: cuando uno de nosotros asía un trozo de alimento, las neuronas del mono se activaban según la pauta en que se excitaban cuando el trozo lo agarraba el propio simio. ¿Obedecía ese fenómeno a una circunstancia trivial? ¿Se debía al movimiento inadvertido del mono mientras observaba nuestros manejos? Una vez descartadas esa y otras posibilidades (verbigracia, que los monos estuvieran esperando comer), terminamos por comprender que el patrón de actividad neuronal asociado a la acción observada constituía una representación cerebral genuina del acto en sí, con independencia de quién lo realizara.

En investigaciones biológicas es frecuente establecer la función de un gen, una proteína o un grupo de células por un método muy directo: la eliminación de ese elemento y la determinación posterior de trastornos en la salud o el comportamiento del organismo. Pero la técnica no nos sirvió para determinar la misión de las neuronas espejo. Se extendían éstas a regiones importantes de uno y otro hemisferio, incluidas las cortezas premotora y parietal: la destrucción del sistema neuronal especular implicado hubiera producido en los monos un déficit cognitivo tan general, que hubiera resultado imposible aislar los efectos específicos de las células eliminadas.

Necesitábamos, pues, otro enfoque. Para demostrar que las neuronas espejo no sólo registraban la visión de un acto, sino que intervenían también en la comprensión del mismo, evaluamos la respuesta neuronal en los casos en que los monos comprendieran el significado de un acto sin verlo. Si, en efecto, las neuronas espejo mediaban la comprensión, su actividad debería reflejar el sentido de un acto más allá de sus propiedades visuales. Acometimos dos series de experimentos.

Primero nos propusimos determinar si las neuronas espejo de F5 "reconocían" acciones sólo por su sonido. Registramos las neuronas espejo de un mono mientras observaba una acción motora de la mano a la que acompaña un sonido inconfundible (rasgar un papel o abrir la vaina de un cacahuete). A continuación hicimos oír el mismo sonido al mono. Gran parte de las neuronas espejo de F5 que habían respondido a la observación visual de la acción con sonido lo hicieron también al sonido solo. A estos subgrupos de células les llamamos neuronas espejo audiovisuales.

El paso siguiente se basaba en un supuesto teórico: si las neuronas espejo participaban en la comprensión de un acto, deberían activarse también cuando el mono no veía la acción en sí pero contaba con indicios suficientes para crear una representación mental de la misma. Empezamos por mostrar al mono un voluntario que se dirigía a una ración de comida y la cogía. Se interpuso luego una pantalla ante el mono, para no dejarle ver la mano del voluntario agarrar la comida, con lo que el animal debía limitarse a sospechar el desarrollo ulterior de la operación. Más de la mitad de las neuronas espejo de F5 se excitaron también cuando el mono sólo podía imaginar lo que sucedía tras la pantalla.

Los resultados confirmaban que la actividad de las neuronas espejo refuerza la comprensión de las acciones motoras: siempre que pueda interpretarse una acción por medios no visuales, como la representación sonora o mental, las neuronas espejo seguirán excitándose para señalar el significado de la acción.

Tras los descubrimientos en el cerebro del mono relatados, cabía preguntarse si existía un sistema neuronal especular también en los humanos. Obtuvimos una primera prueba sólida de que así era, a través de una serie de experimentos en los que, mediante diversas técnicas, se detectaron cambios en la actividad de la corteza motora cerebral.

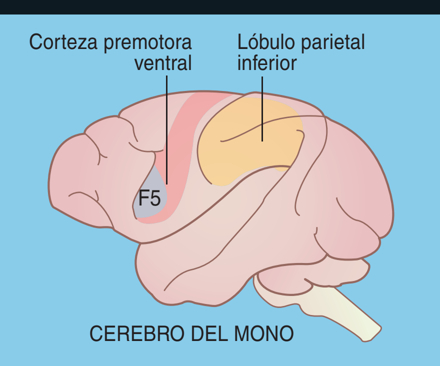
Cuando los voluntarios veían que otra persona agarraba objetos o gesticulaba con el brazo, el aumento de la excitación neural en los músculos de sus manos o brazos que intervendrían en movimientos idénticos a los observados sugería una respuesta neuronal especular en las áreas motoras de su cerebro. La existencia de neuronas espejo humanas recibió una nueva corroboración en investigaciones posteriores que se apoyaban en electroencefalogramas y otras mediciones externas de la actividad cortical. Pero hasta entonces ninguno de

Resumen/Neuronas empáticas

- El cerebro humano y el del mono cuentan con grupos de neuronas que responden cuando un individuo realiza ciertos actos y cuando observa que otros ejecutan los mismos movimientos.
- Estas "neuronas espejo" aportan una experiencia interna directa y, por tanto, una comprensión de los actos, intenciones o emociones de otra persona.
- Las neuronas espejo pueden sustentar también la capacidad de imitar acciones ajenas y, por tanto, el aprendizaje. El mecanismo especular serviría de puente entre dos cerebros para su comunicación y conexión en múltiples niveles.

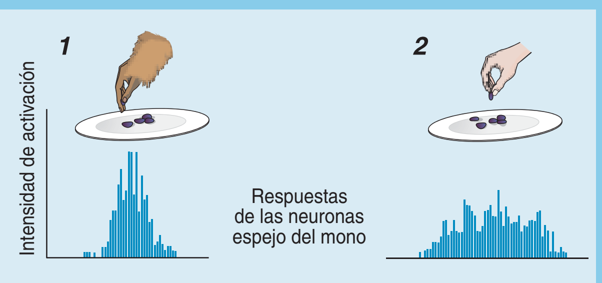
EL REFLEJO DE LA REALIDAD

En experimentos con monos, los autores descubrieron, en áreas motoras del cerebro (*derecha*), subgrupos de neuronas cuya excitación parecía representar las propias acciones. Por tanto, la excitación de tales "neuronas espejo" produciría en un individuo el reconocimiento interno de la acción de otro. Dado que la respuesta de estas neuronas reflejaba la interpretación correcta del objetivo del movimiento, los autores dedujeron que comprender las acciones constituía un fin esencial del mecanismo especular. A partir de las respuestas de las "neuronas espejo" infirieron que esas células nerviosas intervenían en la comprensión de la intención final del agente, pues distinguían entre acciones de agarrar idénticas con propósito distinto.



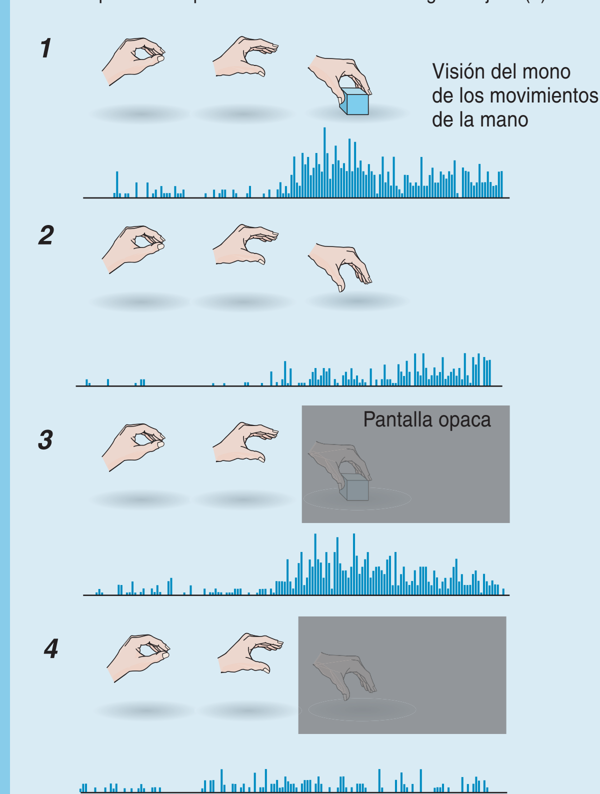
COMPRENSION DE LA ACCION

En las primeras pruebas, cuando el mono agarraba un grano de uva depositado en un plato (*1*), se excitaba intensamente una neurona del área premotora F5, asociada a las operaciones de manos y boca. Esa mismo neurona respondió también con fuerza cuando un agente tomó la uva ante la mirada del mono (*2*).



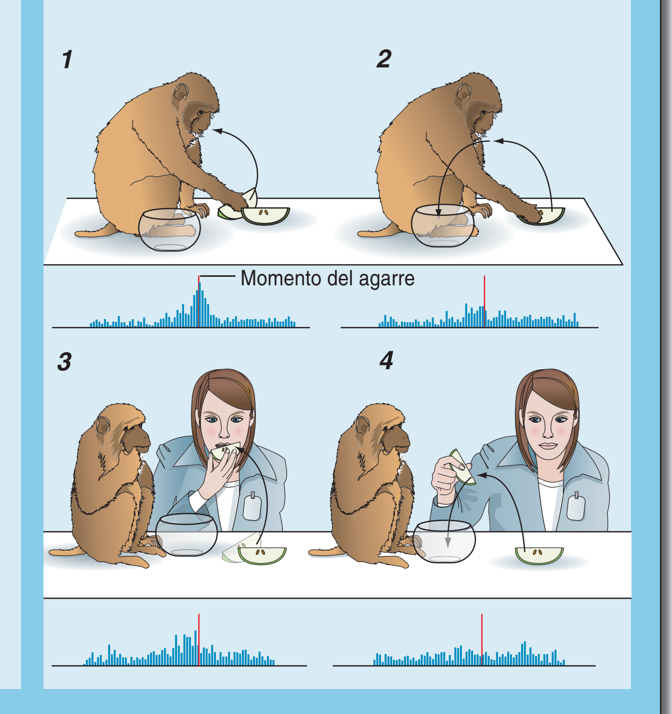
DISCRIMINAR EL OBJETIVO

Una neurona espejo de F5 se excitó intensamente cuando el mono observaba que la mano de un agente se movía para agarrar un objeto (*1*), pero no cuando la mano se movía sin propósito claro (*2*). La misma neurona respondió a una acción dirigida a un objetivo cuando el mono sabía que había un objeto detrás de la pantalla opaca, aunque no viera la secuencia completa de la ejecución (*3*). La neurona respondió débilmente cuando el mono sabía que tras la pantalla no se ocultaba ningún objeto (*4*).

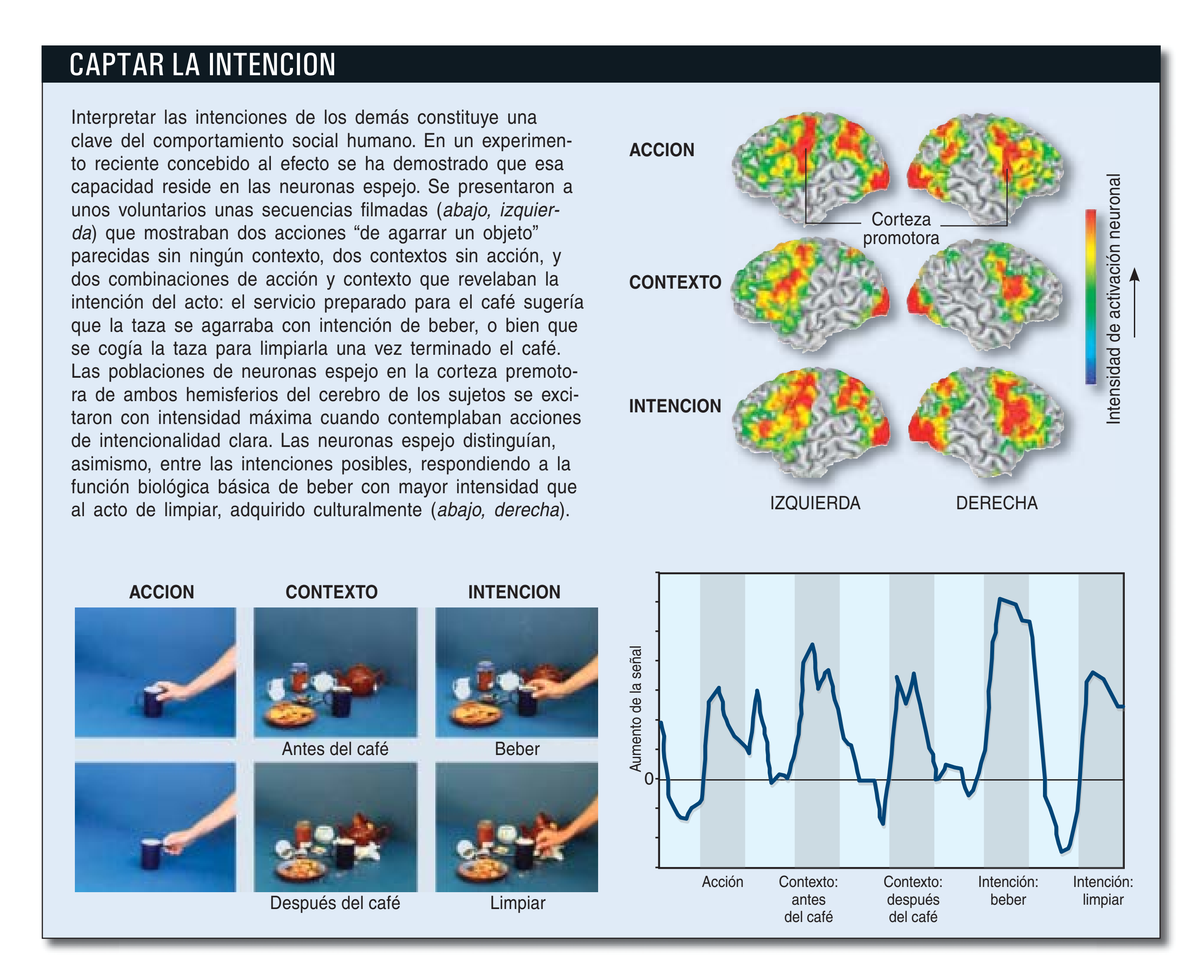


DISCERNIR LA INTENCION

La lectura de las respuestas de una neurona del lóbulo parietal inferior mostró una excitación intensa cuando el mono agarraba una fruta para llevársela a la boca (*1*). La respuesta era menos intensa si el mono la agarraba para echarla a un cuenco (*2*). Esa misma neurona respondía también con intensidad cuando el mono veía a un agente coger la fruta para comérsela (*3*) y débilmente ante la acción de cogerla para echarla al cuenco (*4*). En todos los casos, la respuesta estaba asociada a la acción de agarrar. De ello se infería que en la excitación inicial de la neurona ya venía codificada una comprensión de la intención final.



LUCY READING-IKKANDA



CAPTAR LA INTENCION

Interpretar las intenciones de los demás constituye una clave del comportamiento social humano. En un experimento reciente concebido al efecto se ha demostrado que esa capacidad reside en las neuronas espejo. Se presentaron a unos voluntarios unas secuencias filmadas (*abajo, izquierda*) que mostraban dos acciones "de agarrar un objeto" parecidas sin ningún contexto, dos contextos sin acción, y dos combinaciones de acción y contexto que revelaban la intención del acto: el servicio preparado para el café sugería que la taza se agarraba con intención de beber, o bien que se cogía la taza para limpiarla una vez terminado el café. Las poblaciones de neuronas espejo en la corteza premotora de ambos hemisferios del cerebro de los sujetos se excitaron con intensidad máxima cuando contemplaban acciones de intencionalidad clara. Las neuronas espejo distinguían, asimismo, entre las intenciones posibles, respondiendo a la función biológica básica de beber con mayor intensidad que al acto de limpiar, adquirido culturalmente (*abajo, derecha*).

los métodos utilizados nos permitía acotar con precisión las áreas del cerebro que se activaban al observar acciones motoras. Así las cosas, nos dispusimos a explorar la cuestión mediante técnicas de formación de imágenes del cerebro.

En aquellos experimentos, llevados a cabo en el Hospital San Rafael, de Milán, utilizamos tomografía por emisión de positrones (TEP) para observar la actividad neuronal en el cerebro de voluntarios humanos, mientras contemplaban diversas formas de asir algo la mano y, luego, como referencia, miraban a objetos fijos. En tales situaciones, la visión de acciones realizadas por otros excitaba tres áreas principales de la corteza cerebral. De una de ellas, el surco temporal superior (STS), sabemos que alberga neuronas que responden a la observación de miembros corporales en movimiento. Las otras dos, el lóbulo parietal inferior (LPI) y el giro frontal inferior (GFI), corresponden, respectivamente, al LPI y a la corteza premotora ventral del mono (que incluye la F5), las áreas donde habíamos registrado neuronas espejo con anterioridad.

De los resultados se infería que un mecanismo especular operaba también en el cerebro humano, pero no revelaban del todo su alcance. Por ejemplo, si las neuronas espejo permiten la comprensión directa, a través de la propia experiencia, de un acto observado, ¿en qué medida el objetivo final de la acción es a su vez un componente de esa "comprensión"?

Intencionalidad

Volviendo a nuestro ejemplo inicial, decíamos que Pablo sabe que Elena está cortando una flor con la intención de ofrecérsela. En ese contexto, la sonrisa de Elena da una clave para conocer su propósito, decisiva para que Pablo comprenda el paso siguiente: Elena le entrega la flor y completa los movimientos que constituyen ese acto.

Cuando el gesto lo hacemos nosotros, desarrollamos una secuencia de acciones motoras cuyo orden viene determinado por nuestra intención. Con una serie de movimientos recogeríamos la flor y la acercaríamos a la nariz para olerla; con una serie parcialmente distinta tomaríamos la flor y la entregaríamos a otra persona.

Ante semejante situación, nos propusimos investigar si las neuronas espejo permiten comprender la intención mediante la distinción entre acciones similares con objetivos diferentes.

Volvimos a nuestros monos. Registramos sus neuronas parietales en condiciones diversas. En un planteamiento experimental tenían que agarrar una ración y llevársela a la boca. A continuación, debían tomar

FUENTE: "GRASPING THE INTENTIONS OF OTHERS WITH ONE'S OWN MIRROR NEURON SYSTEM", POR M. IACOBONI ET AL., EN *PLOS BIOLOGY*, VOL. 3, N.º 3; LUCY READING-IKKANDA (*gráfica*)

esa misma porción y echarla a un cuenco. Con gran interés observamos que, dependiendo del objetivo final (la intención), la mayoría de las neuronas registradas se activaban de modo distinto durante la acción de agarrar. Se demostraba así que el sistema motor se organiza en cadenas neuronales, cada una de las cuales codifica la intención específica del acto.

¿Serviría ese mecanismo para explicar nuestra forma de comprender las intenciones ajenas?

Para someter a prueba las propiedades especulares de esas neuronas "aprehensoras", provocamos que un mono observara a un investigador en el curso de la ejecución de tareas que el animal había desempeñado antes. En cada caso, la mayoría de las neuronas espejo se activaron de una manera diferente, en función del destino: llevarse la comida a la boca o verterla en el cuenco. Los patrones de activación neuronal en el cerebro del mono coincidían exactamente con los observados cuando el propio mono realizaba esos actos: las neuronas espejo que se excitaban con mayor intensidad durante la acción "agarrar para comer" y no en la de "agarrar para echar al cuenco" se comportaron igual cuando el mono veía ejecutar la acción correspondiente.

Parece, pues, que existe una relación clara entre la organización motora de las acciones deliberadas y la capacidad de comprender las intenciones de los demás. Cuando los monos observaban una acción en un contexto determinado, les bastaba contemplar la primera fase de la sucesión entera de movimientos (agarrar) para excitar unas neuronas espejo que formaban una cadena motora en la que se codificaba también una intención específica. La activación particular de una cadena u otra mientras observaban el comienzo de la acción dependía de varios factores: naturaleza del objeto en cuestión, contexto y memoria de lo que antes hiciera el agente observado.

Para comprobar si existe en los humanos un mecanismo de lectura de intenciones semejante, colaboramos con el equipo de Marco Iacoboni, de la Universidad de California en Los Angeles. Se obtuvieron imágenes por resonancia magnética (RM) de un grupo de voluntarios. Se presentaron ante los participantes tres clases de estímulos, incluidos en secuencias filmadas.

El primer conjunto de imágenes mostraba, sobre un fondo vacío, una mano que asía de dos maneras distintas una taza. El segundo constaba de dos escenas que contenían platos y cubiertos: en una, preparados para servir el café y, en la otra, terminado ya el café y en espera de limpieza. El tercer grupo de estímulos mostraba una mano asiendo la taza en uno u otro de esos dos contextos.

Se trataba de averiguar si las neuronas espejo humanas distinguirían entre agarrar una taza para beber, como sugiere el contexto de "preparados para el café", y agarrar la taza para retirarla, como indica el contexto de "limpieza". Los resultados demostraron no sólo que ello era cierto, sino además que el sistema especular respondía intensamente a la componente intencional de un acto. Los sujetos de la prueba que observaban las acciones motoras de la mano en los contextos de "beber" o "limpiar" mostraron grados de excitación distintos en sus neuronas espejo; la intensidad en ambas situaciones era mayor que cuando observaban la mano agarrando una taza fuera de todo contexto o cuando contemplaban sólo los platos y cubiertos.

Humanos y monos son especies sociales. Por tanto, no es difícil apreciar las ventajas evolutivas (de supervivencia) de un mecanismo, basado en neuronas espejo, que fija las acciones motoras esenciales dentro de una red motora semántica de mayor extensión, por una razón poderosa: facilita la interpretación directa e inmediata de las conductas ajenas sin necesidad de procesos cognitivos complejos. En la vida social, la interpretación correcta de las emociones de los demás reviste importancia; de hecho, la emoción suele ser un elemento contextual clave que señala el propósito de un acto. Varios grupos venimos investigando si el sistema especular nos faculta para comprender lo que otros sienten, además de lo que hacen.

Conectar y aprender

Nuestra interpretación de las emociones ajenas, igual que la de las acciones, no sigue un camino único. La observación de alguien emocionado provoca una elaboración cognitiva de esa información sensorial, que, en último término, proporciona una conclusión lógica sobre los sentimientos que embargan al otro. Una observación que también podría provocar la elaboración de un mapa de esa información sensorial en las estructuras motoras que despertarían idéntica emoción en el observador.

Entre una y otra forma de interpretación o comprensión media un profundo abismo. En la primera, el observador infiere la emoción, sin experimentarla; en la segunda, la emoción se reconoce directamente porque los mecanismos especulares reproducen el mismo estado emocional en el observador. Por eso, la consabida frase "le acompaño en el sentimiento", que indica a la vez comprensión y empatía, quizás exprese una verdad literal de la que no seamos del todo conscientes.

Hallamos un ejemplo paradigmático en la emoción de repugnancia, reacción básica cuya expresión importa para la supervivencia de miembros de una especie. En su forma más primitiva, indica que algo probado u olido por un individuo es malo y, casi seguro, peligroso. Una vez más, en colaboración con neurocientíficos franceses, recurrimos a la resonancia magnética para demostrar que la sensación de repugnancia causada al aspirar olores fétidos y la observación de asco en el semblante de otra persona activan la misma estructura neural (la ínsula anterior) en puntos idénticos de dicha estructura. De lo que se desprende que las poblaciones de neuronas espejo de la ínsula se excitan tanto si los participantes en la prueba experimentan la emoción como si la ven expresada en otros. Con otros términos, el observador y el observado comparten un mecanismo neuronal que vehicula una forma de comprensión por experiencia directa.

El grupo formado en torno a Tania Singer, del Colegio Universitario de Londres, descubrió coincidencias semejantes entre las emociones experimentadas y observadas en el contexto del dolor. Los participantes en el estudio sintieron el dolor producido al aplicarles electrodos en las manos; después, contemplaron la aplicación de electrodos en la mano de un compañero, seguida por una

indicación de estimulación dolorosa. Ambas situaciones excitaron las mismas regiones de la ínsula anterior y de la corteza cingulada anterior en los sujetos del ensayo.

Tomados en conjunto, los datos no admiten dudas: los humanos captamos emociones, al menos emociones negativas intensas, a través de un mecanismo directo de cartografiado en el que intervienen partes del cerebro que generan respuestas motoras viscerales. Por supuesto, este mecanismo especular de captación de emociones no explica por entero la cognición social, pero aporta una base neuronal para algunas relaciones interpersonales sobre las que se construyen comportamientos sociales de cierta complejidad. Tal vez constituya un sustrato para la comunicación afectiva con los demás; sus anomalías podrían intervenir en los déficits de empatía, como los que se aprecian en los niños autistas.

Numerosos laboratorios, incluido el nuestro, siguen analizando estas cuestiones. Les anima el interés intrínseco del tema y las posibles aplicaciones terapéuticas. Si la experiencia ha inscrito el patrón de una acción motora en las neuronas especulares, en teoría sería posible aliviar trastornos de la movilidad, como los ocasionados por un ictus, mediante la potenciación de patrones de acciones que no hayan quedado dañados. Pruebas recientes indican que el mecanismo especular interviene en el aprendizaje de nuevas facultades.

La imitación dista de hallarse desarrollada entre los primates no humanos. Se da raras veces en monos; en los grandes simios (chimpancés y gorilas), es limitada. Para los humanos, sin embargo, la imitación constituye un instrumento de interés máximo para el aprendizaje y la transmisión de destrezas, lenguas y cultura. ¿Se apoyó en el sustrato neuronal del sistema especular este salto evolutivo desde nuestros antepasados primates? Iacoboni y su grupo aportaron las primeras pruebas de que pudiera ser así. Utilizaron imágenes obtenidas por resonancia magnética para observar humanos que contemplaban e imitaban movimientos de dedos. Ambas actividades excitaban el giro frontal inferior (GFI, parte del sistema especular), sobre todo cuando el movimiento tenía un fin específico.

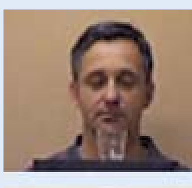
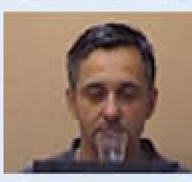
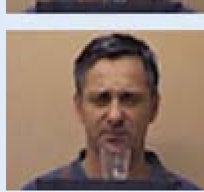
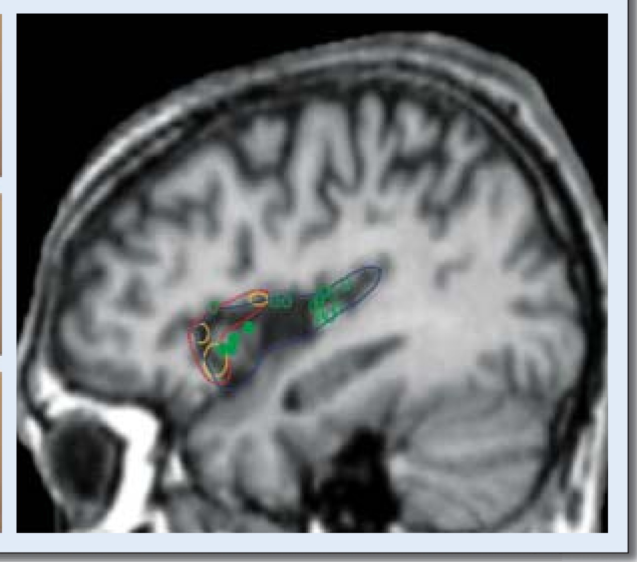
En todos estos ensayos, empero, los movimientos a imitar eran sencillos y reiterativos. ¿Qué función desarrollarían las neuronas espejo cuando aprendemos por imitación acciones complejas y nuevas? Para responder a esa pregunta, Giovanni Buccino, de nuestra universidad, y otros colaboradores en Alemania analizaron mediante imágenes por resonancia magnética la imitación posterior de los movimientos de cuerdas de guitarra tocadas por un experto. Mientras los sujetos de la prueba observaban al guitarrista, su sistema de neuronas espejo parietofrontales se activó. La misma área se excitó con intensidad mayor cuando los sujetos imitaban los movimientos de las cuerdas. Cabe señalar que en el intervalo siguiente a la observación, mientras los participantes preparaban su imitación del guitarrista, entró en actividad otra región del cerebro: el área prefrontal 46. Esta se asocia a la memoria de planificación y operaciones motoras; puede, por tanto, desarrollar una función esencial en el correcto encadenamiento de los pasos elementales que constituyen la acción a imitar.

Durante largo tiempo los neurocientíficos se han sentido desconcertados ante numerosos aspectos de la imitación. Así, el modo en que el cerebro de un individuo acepta la información visual y la interpreta para traducirla a términos de movimiento. Si el sistema de neuronas espejo sirviera de puente en ese proceso, amén de vehicular la comprensión de las acciones, intenciones y emociones de otras personas, habría quizás evolucionado hasta convertirse en componente destacado de la capacidad humana de aprender, a través de la observación, refinadas habilidades cognitivas.

No sabemos todavía si el sistema neuronal especular es exclusivo de los primates o si lo comparten con otros animales. Nuestro grupo ensaya ahora con ratas para averiguar si presentan o no respuestas especulares en sus neuronas. Esta propiedad especular interna puede haberse desarrollado en una fase tardía de la evolución, lo que explicaría una implantación en los humanos mayor que en los monos. Dado que hasta los hombres y monos recién naci-

ESPEJOS EMOCIONALES

Sintieran repugnancia por mal olor o vieran imágenes de otras personas expresando repulsión (*izquierda*), en el cerebro de los individuos se excitaban regiones similares. En este corte transversal del cerebro se enmarcan en rojo las poblaciones de neuronas activadas al experimentar repugnancia y en amarillo las que se excitan por la mera visión de tal sensación. (La región estudiada se delimita en azul; en verde, las examinadas en un estudio anterior.) Estos grupos de neuronas que se superponen tal vez representen un mecanismo físico neuronal de la empatía humana que nos permite comprender las emociones de nuestros semejantes.



2. LA IMITACION requiere la reproducción de la acción que ejecuta otro. Si las neuronas espejo se hallan detrás de esta singular facultad humana (la imitación), el sistema especular podría vehicular la enseñanza y el aprendizaje de nuevas destrezas.

dos imitan gestos sencillos, como el de sacar la lengua, la capacidad de crear patrones especulares de acciones observadas podría ser innata. La incapacidad de reflejar emociones parece ser una nota distintiva del autismo; por ello, trabajamos con niños autistas para desentrañar si sufren deficiencias motoras que pudieran indicar un trastorno del sistema neuronal especular.

Sólo ha transcurrido un decenio desde que publicamos nuestros descubrimientos acerca de las neuronas espejo. Muchas preguntas siguen sin respuesta, incluido el posible cometido del sistema especular en el lenguaje. El sistema de neuronas espejo en nuestra especie incluye el área de Broca, centro cortical fundamental relacionado con el lenguaje, una de las facultades distintivas del hombre. Y si es verdad, como creen algunos lingüistas, que la comunicación humana empezó con gestos de cara y de manos, las neuronas espejo habrían desarrollado una función principal en la evolución del lenguaje.

De hecho, el mecanismo especular resuelve dos problemas de comunicación fundamentales: la paridad y la comprensión directa. La paridad requiere que el mensaje tenga el mismo significado para emisor y receptor. La comprensión directa implica que no se necesite acuerdo previo entre los individuos —símbolos arbitrarios, por ejemplo— para que se entiendan entre sí. El acuerdo es inherente a la organización neural de ambas personas. Los espejos interiores tal vez sean lo que necesitan nuestros personajes, Pablo y Elena, para comunicarse sin palabras, y en general los seres humanos para comunicarse en múltiples niveles.

Los autores

Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi y Vittorio Gallese trabajan en la Universidad de Parma, cuyo departamento de neurociencias dirige Rizzolatti. Fogassi y Gallese desempeñan actividades docentes. Desde que, en los primeros años noventa, descubrieron las neuronas espejo, han seguido investigando sobre esas células en monos y humanos, así como la función del sistema motor en la cognición.

Bibliografía complementaria

ACTION RECOGNITION IN THE PREMOTOR CORTEX. Vittorio Gallese, Luciano Fadiga, Leonardo Fogassi y Giacomo Rizzolatti en *Brain*, vol. 119, n.º 2, págs. 593-609; abril de 1996.

A UNIFYING VIEW OF THE BASIS OF SOCIAL COGNITION. V. Gallese, C. Keysers y G. Rizzolatti en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, págs. 396-403; 2004.

GRASPING THE INTENTIONS OF OTHERS WITH ONE'S OWN MIRROR NEURON SYSTEM. Marco Iacoboni y otros en *PLoS Biology*, vol. 3, n.º 3, págs. 529-535; marzo de 2005.

PARIETAL LOBE: FROM ACTION ORGANIZATION TO INTENTION UNDERSTANDING. Leonardo Fogassi y otros en *Science*, vol. 302, págs. 662-667; 29 de abril, 2005.



ESPEJOS ROTOS: UNA TEORIA DEL AUTISMO

Los estudios del sistema neuronal especular podrían ayudar a determinar las causas del autismo. Con ello facilitarían el desarrollo de nuevas vías de su diagnosis y tratamiento

Vilayanur S. Ramachandran y Lindsay M. Oberman

A primera vista quizá no notemos nada anormal en un chico que padece autismo. Pero si intentamos hablar con él, pronto percibiremos que algo importante falla. Puede que no nos mire a los ojos, sino que desvíe la mirada y se agite, meciéndose de un lado a otro o dando cabezazos contra la pared. O más extraño todavía: se muestra incapaz de sostener nada remotamente parecido a una conversación normal. Aunque pueda sentir miedo, ira o placer, tal vez carezca de empatía genuina hacia otras personas. Le dejan impávido sutiles signos sociales que la mayoría de los niños captan sin dificultad.

En los años cuarenta del siglo pasado, Leo Kanner en EE.UU. y Hans Asperger en Austria descubrieron por separado este trastorno del desarrollo. (En Estados Unidos afecta al 0,5 por ciento de los niños.) Cada uno de esos médicos desconocía por completo los trabajos del otro, pero por asombrosa coincidencia dieron el mismo nombre al síndrome: *autismo*, derivado de la raíz griega αυτο ("propio"). El nombre resulta muy adecuado, porque lo que más destaca es el retraimiento de la interacción social. Ultimamente, los médicos han adoptado la expresión "trastorno en la gama del autismo", para aclarar que la enfermedad se manifiesta en múltiples variantes afines que cubren una escala de gravedad muy amplia, aunque comparten algunos síntomas característicos.

Desde que se identificara el autismo, se han prodigado esfuerzos por determinar su causa. Se sabe que la susceptibilidad al autismo es hereditaria, sin que se descarte la participación de factores de riesgo ambientales [*véase* "Autismo precoz" por Patricia M. Rodier; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2000]. A finales del decenio de los noventa, nuestro laboratorio de la Universidad de California en San Diego comenzó a investigar la posible conexión entre autismo y neuronas espejo, una clase recién descubierta de células nerviosas del cerebro.

La probada participación de esas neuronas en facultades como la empatía y la percepción de las intenciones ajenas sustentaba la hipótesis de que algunos de los síntomas del autismo obedecieran a una disfunción del sistema neuronal especular. Diversas investigaciones realizadas en el curso

LOS NIÑOS AUTISTAS tienen dificultades con la interacción social. Quizá sea porque su sistema de neuronas espejo no funciona correctamente.

CARY WOLINSKY (*fotografía*); JEN CHRISTIANSEN (*fotomontaje*)

de los últimos diez años han venido a confirmar nuestra tesis. Quizás en próximos estudios se explique cómo aparece el autismo. Ello contribuirá al desarrollo de métodos de diagnosis y tratamiento.

Los síntomas

Aunque los principales signos distintivos del autismo sean el aislamiento social, la huida del contacto visual, la pobreza de lenguaje y la ausencia de empatía, se dan también otros síntomas menos conocidos. Uno muy corriente es la dificultad en comprender metáforas; los autistas las interpretan a veces de forma literal. Les cuesta también imitar las acciones de otras personas. A menudo se comportan de un modo excéntrico, tomando a broma y despreciando aspectos importantes de su entorno, sobre todo el medio social que les rodea. Desconcierta igualmente la extremada aversión que les producen ciertos sonidos que, sin motivo claro, disparan alarmas en su mente.

Para explicar el autismo se han propuesto dos clases de teorías: anatómicas y psicológicas. (Los expertos han rechazado un tercer grupo de teorías que achacan el trastorno a una mala crianza.) Eric Courchesne, de la Universidad de California en San Diego, y otros anatomistas han demostrado que los niños autistas presentan anomalías características en el cerebelo, la estructura cerebral responsable de la coordinación de movimientos musculares voluntarios complejos.

Sin dejar de tener en cuenta estas observaciones, sería prematuro asegurar que las lesiones del cerebelo constituyen la única causa del autismo. Los daños que produce un ictus en un cerebelo infantil suelen manifestarse por temblores, pasos vacilantes y movimientos oculares anormales, síntomas muy raros en un autista. A la inversa, no se aprecia ninguna de las señales típicas del autismo en pacientes con lesión cerebelar. Posiblemente las alteraciones del cerebelo observadas en niños autistas se deban a efectos laterales inconexos de genes mutantes cuyos *otros* efectos sean las verdaderas causas del trastorno.

De las teorías psicológicas, la más ingeniosa sea quizá la de Uta Frith, del Colegio Universitario de Londres, y Simon Baron-Cohen, de la Universidad de Cambridge. Ambos postulan que la principal anomalía del autismo consiste en no poder elaborar una "teoría de las mentes ajenas". Según ellos, en el cerebro hay circuitos nerviosos especializados que nos permiten crear ingeniosas hipótesis sobre cómo opera la mente de otra persona. Tales hipótesis sirven, a su vez, de base para predecir con acierto las conductas ajenas.

Sin duda, Frith y Baron-Cohen están en el buen camino, pero su teoría no explica enteramente el cúmulo de síntomas, en apariencia inconexos, del autismo. Negarles a los autistas capacidad de interacción social porque carecen de una "teoría de las mentes ajenas" es caer en la tautología. Se impone determinar los mecanismos cerebrales cuyas funciones coincidan con las alteradas por el autismo.

Una valiosa pista proviene de los trabajos de Giacomo Rizzolatti y su grupo, de la Universidad de Parma. En los años noventa, investigaron la actividad neuronal en el cerebro de macacos, mientras los simios realizaban acciones dirigidas a un objetivo. Hace decenios que se sabe que ciertas neuronas de la corteza premotora —parte del lóbulo frontal del cerebro— intervienen en el control de los movimientos voluntarios. Una neurona se activará cuando el mono agarra un cacahuete, otra cuando el animal tira de una palanca, etcétera. Suelen llamarse neuronas de control motor. (Recuérdese que la neurona cuya actividad se graba no controla el brazo por sí misma; forma parte de un circuito cuyo seguimiento se realiza mediante la observación de las señales de las neuronas que lo constituyen.)

Lo que sorprendió a Rizzolatti fue que un subgrupo de las neuronas de control motor se activara también cuando el simio veía realizar esa misma acción a otro congénere o a un investigador. Por ejemplo, una neurona de las que controlaban la acción de "agarrar el cacahuete" se excitaba cuando el simio veía hacer ese movimiento a uno de sus compañeros. Se demostró luego, por medio de técnicas de formación de imágenes, la existencia de neuronas espejo en las regiones correspondientes de la corteza cerebral humana. Se comprobó así que las neuronas espejo —más exactamente, las redes de las que forman parte— no sólo envían órdenes motoras sino que permiten a simios y humanos determinar las intenciones de otros individuos mediante la simulación mental de sus actos. Su cometido en los simios tal vez se limite a predecir acciones sencillas con un objetivo concreto; en los humanos, en cambio, el sistema neuronal especular puede haber desarrollado la capacidad de interpretar intenciones más complejas.

La investigación posterior demostró que había neuronas espejo en otras partes del cerebro humano (las cortezas cingulada e insular), que intervienen presumiblemente en las respuestas emocionales propias de la empatía. Al estudiar la corteza cingulada anterior de personas despiertas, se encontró el fenómeno siguiente: ciertas neuronas que suelen excitarse en respuesta al dolor lo hacen también cuando el individuo ve sufrir dolor a otra persona.

Las neuronas espejo podrían intervenir, asimismo, en la imitación, facultad que los primates poseen en un grado rudimentario y alcanza su pleno desarrollo en los humanos. La propensión a imitar debe ser, al menos en parte, innata. Según demostró Andrew Meltzoff, de la Universidad de Washington, si se saca la lengua a un bebé recién nacido, la criatura repite el gesto. Y es imposible que

Resumen/Neuronas espejo y autismo

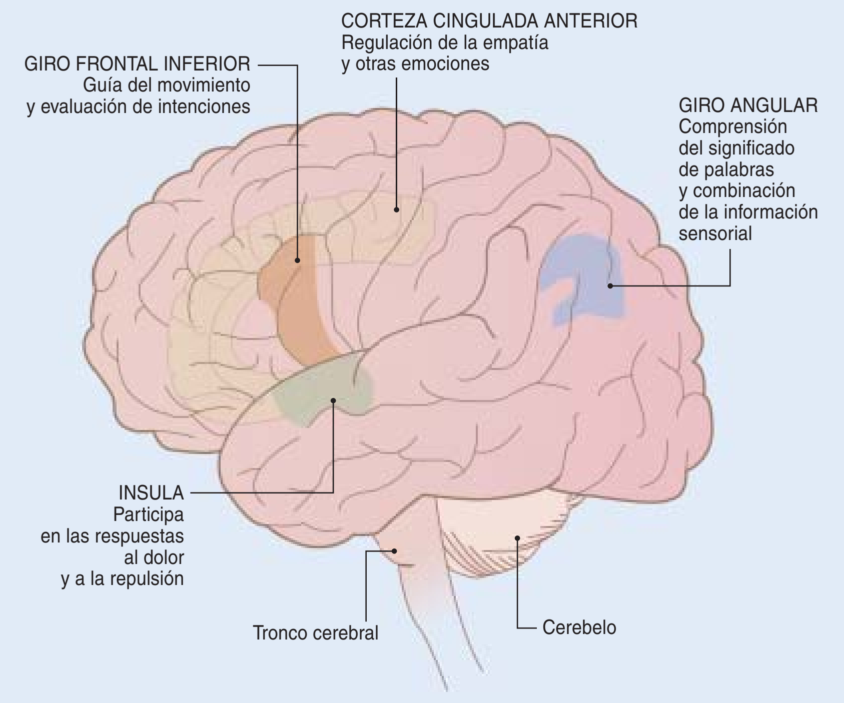
- Las neuronas espejo se hallan comprometidas en la interacción social. Su disfunción podría ocasionar algunos de los síntomas primarios del autismo, como el aislamiento y la ausencia de empatía.
- La investigación sobre autistas demuestra falta de actividad neuronal especular en varias regiones del cerebro. Los tratamientos encaminados a restaurar esa actividad quizás aliviarían algunos síntomas.
- Una hipótesis complementaria, la teoría del paisaje resaltado, justificaría la hipersensibilidad y otros síntomas secundarios del autismo.

lo haya aprendido a través de realimentación visual y corrección de errores, pues el bebé no se puede ver la lengua. El cerebro del niño debe contar, pues, con un mecanismo de conexiones prefijadas que elabore un mapa de los gestos de la madre —ya sea sacar la lengua o sonreír— en las neuronas de control motor.

El desarrollo del lenguaje durante la infancia requiere cartografiar de nuevo la distribución entre las áreas cerebrales. Para imitar palabras que pronuncia la madre o el padre, el cerebro del niño debe transformar las señales percibidas en los centros de audición de los lóbulos temporales del cerebro en formas verbales que emite la corteza motora. Se desconoce todavía si las neuronas espejo participan directamente en ello, pero está claro que ocurre algún proceso análogo. En último término, las neuronas espejo tal vez permitan que los humanos se vean a sí mismos como otros los ven, facultad que podría resultar esencial para la autoconsciencia y la introspección.

ANATOMIA DEL AUTISMO

Las personas afectadas de autismo muestran menoscabada la actividad de sus neuronas espejo en el giro frontal inferior, una parte de la corteza premotora del cerebro; quizás ello explique su incapacidad para captar las intenciones de los demás. Las disfunciones de las neuronas espejo en la ínsula y en la corteza cingulada anterior podrían responsabilizarse de síntomas afines, como la ausencia de empatía; los déficits en el giro angular darían origen a dificultades de lenguaje. Los autistas presentan también alteraciones estructurales en el cerebelo y el tronco cerebral.



LUCY READING-IKKANDA

Supresión de las ondas mu

¿Qué tiene todo esto que ver con el autismo? Al final de los noventa, nuestro grupo advirtió que las neuronas espejo realizaban las mismas funciones que parecen desarboladas en el autismo. Si el sistema neuronal especular interviene de veras en la interpretación de intenciones complejas, una rotura de esos circuitos neuronales explicaría el déficit más llamativo en el autismo: la carencia de facultades sociales. Los demás signos distintivos de la enfermedad —ausencia de empatía, trastornos del lenguaje e imitación deficiente, entre otros— coinciden con los que cabría esperar en caso de disfunción en las neuronas espejo.

El grupo de Andrew Whitten, de la Universidad escocesa de St. Andrews, propuso, casi al mismo tiempo que nosotros, igual hipótesis. Pero la primera comprobación experimental se realizó en nuestro laboratorio, donde colaboraban Eric L. Altschuler y Jaime A. Pineda, de la Universidad de California en San Diego.

Para demostrar que los niños con autismo sufrían disfunción en las neuronas espejo, debíamos encontrar un modo de observar la actividad de sus células neuronales sin necesidad de implantarles electrodos en el cerebro (como hicieron Rizzolatti y los suyos con los simios). Descubrimos que ello era factible mediante la medición de sus ondas cerebrales en un electroencefalograma (EEG).

Desde hace más de medio siglo se sabe que una onda componente del EEG, la onda mu, se bloquea cada vez que la persona mueve un músculo deliberadamente, abrir y cerrar la mano, por ejemplo. Curiosamente, esa componente se bloquea también cuando el sujeto ve que otro realiza la misma acción. Uno de los autores (Ramachandran) y Altschuler sugirieron que la supresión de la onda mu podría utilizarse a la manera de sonda, sencilla y no invasiva, para la observación de la actividad neuronal especular.

Decidimos centrar los primeros experimentos en un niño autista de alto funcionamiento, es decir, que no presentara deficiencias cognitivas graves. (Los niños muy pequeños, de bajo funcionamiento, no participaron en el estudio porque queríamos asegurar que cualquier diferencia que encontrásemos no se debería a problemas de atención, de comprensión de instrucciones, ni a los efectos generales del retraso mental.) El EEG demostró que en el cerebro del paciente se observaba una onda mu, que se suprimía cuando ejecutaba un movimiento voluntario sencillo, igual que sucedía en un niño normal. Pero cuando el niño autista vio realizar esa acción a otro, no se produjo la supresión. Dedujimos, en coherencia, que su sistema de control motor permanecía intacto y era deficiente su sistema neuronal especular. Esta observación, que presentamos a la reunión anual de la Sociedad Norteamericana de Neurociencia en 2000, respaldaba con rotundidad nuestra hipótesis.

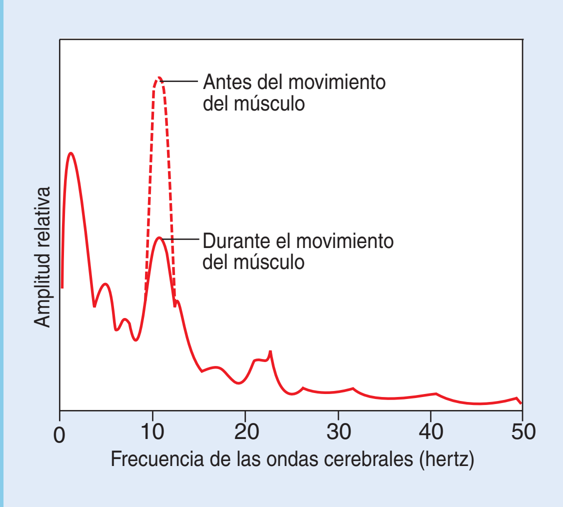
Sin duda, debe evitarse cualquier generalización a partir de un caso aislado. Por eso desarrollamos una serie de pruebas más sistemáticas con 10 individuos de alto funcionamiento

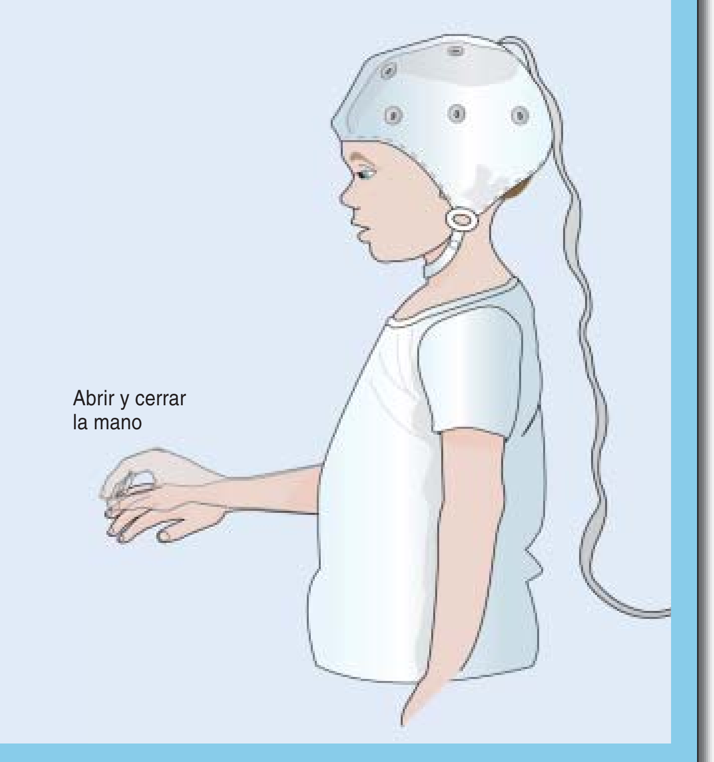
ATENCION A LAS ONDAS MU

La investigación del sistema neuronal especular en los autistas se apoyó en una observación: la excitación de las neuronas de la corteza premotora suprime la onda mu, una componente del electroencefalograma (EEG) que mide la actividad cerebral. (Las ondas mu se producen en la gama de 8 a 13 hertz.) Se observaron las ondas mu de niños autistas y de sujetos de control cuando movían músculos deliberadamente y después cuando contemplaban las mismas acciones en vídeo.

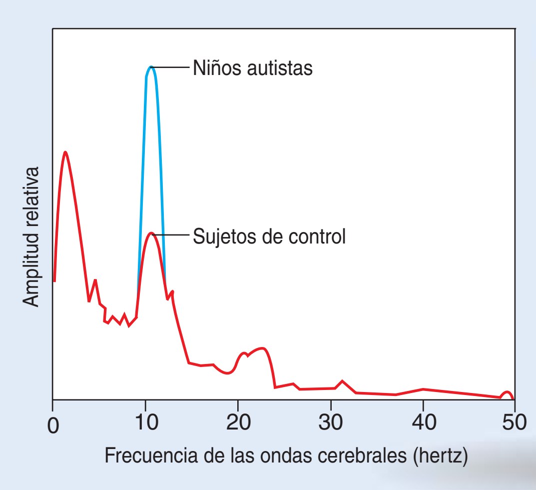
REALIZAR LA ACCION

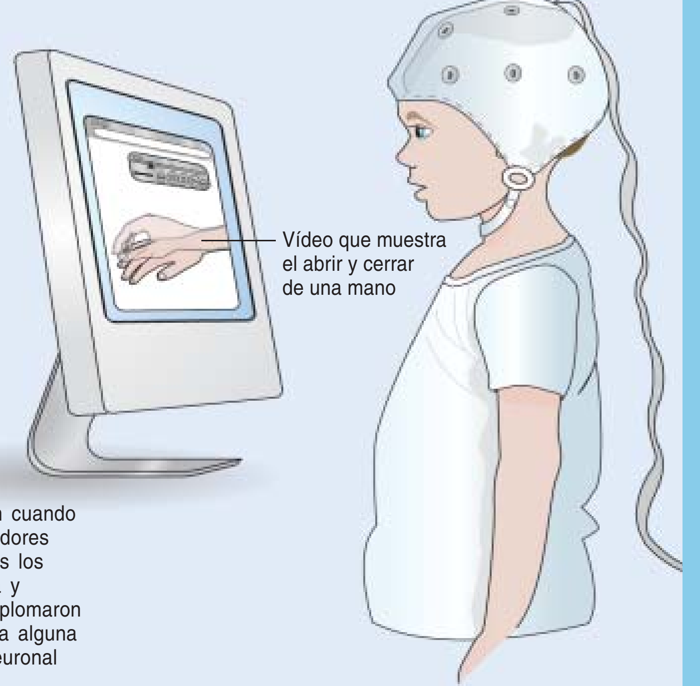
Las neuronas de control motor se excitan siempre que la persona mueve un músculo deliberadamente. Se pidió a todos los sujetos presentes que abrieran y cerrasen la mano derecha. Según lo esperado, este acto hizo caer la amplitud de las ondas mu en los niños autistas así como en los que servían de referencia.





SIMULAR LA ACCION





Las neuronas espejo de la corteza premotora se excitan cuando la persona ve que otro realiza una acción. Los investigadores midieron, a través de EEG, la actividad cerebral mientras los sujetos observaban un vídeo de una mano que se abría y cerraba. Las ondas mu de los sujetos de control se desplomaron (*rojo*); las de los autistas, en cambio, no mostraron caída alguna (*azul*). El resultado sugiere deficiencias en el sistema neuronal especular de los niños autistas.

LUCY READING-IKKANDA

que sufrían trastorno en la gama del autismo y 10 sujetos de control, de la misma edad y sexo. Como era de esperar, en el cerebro de los sujetos de control se suprimían las ondas mu cuando éstos movían la mano y también al contemplar imágenes de otras manos en movimiento. En el EEG de los autistas, en cambio, las ondas mu desaparecían sólo cuando ellos movían su propia mano.

Otros investigadores han confirmado nuestros resultados mediante el seguimiento de la actividad neuronal. El grupo que dirige Riitta Hari, de la Universidad Politécnica de Helsinki, encontró déficits de neuronas espejo en niños autistas. Se sirvió de la magnetoencefalografía, que mide los campos magnéticos producidos por corrientes eléctricas en el cerebro. Más recientemente, el grupo que encabeza Mirella Dapretto, de la Universidad de California en Los Angeles, se ha valido de imágenes de resonancia magnética para mostrar una reducción de la actividad de las neuronas espejo en la corteza prefrontal de individuos autistas. El grupo de Hugo Théoret, de la Universidad de Montreal, ha recurrido a la estimulación magnética transcraneal, una técnica que induce corrientes eléctricas en la corteza motora para generar movimientos musculares, con miras a estudiar la actividad neuronal especular en afectados de autismo. En los sujetos de control, los movimientos de manos inducidos se acentuaron al contemplar esos mismos movimientos grabados en vídeo; en los autistas, el efecto fue mucho más leve.

Tomados en su conjunto, estos hallazgos conforman una prueba incontestable de que las personas autistas sufren disfunción en sus neuronas especulares. Se desconocen todavía los factores de riesgo genéticos y ambientales que impiden el desarrollo de las neuronas espejo o alteran su función. Lo que no empece que muchos investigadores trabajen sobre esta hipótesis, puesto que predice síntomas exclusivos del autismo.

Además de explicar los signos distintivos de autismo, los fallos del sistema neuronal especular dan cuenta de síntomas menos conocidos. Desde hace años, se sabe que los niños autistas tienen problemas para interpretar refranes y metáforas: toman en sentido literal expresiones como “andarse por las ramas”, “ir con pies de plomo” u otras por el estilo. Aunque sólo se manifiesta en algunos niños autistas, esta dificultad reclama explicación.

La comprensión de las metáforas exige la extracción de un denominador común de entidades dispares en su superficie. Consideremos el efecto buba/kiki, descubierto hace más de 60 años por Wolfgang Köhler. En esta prueba se presentan a la audiencia dos dibujos de trazado tosco, uno de contorno mellado y otro curvado, y se les pregunta: “¿Cuál de estas formas es buba y cuál es kiki?” En cualquier lengua que hablen los consultados, el 98 por ciento llama “buba” a la forma curvada y “kiki” a la mellada. El resultado sugiere que el cerebro humano extrae propiedades abstractas de las formas y los sonidos; por ejemplo, la propiedad de melladura, integrada en el dibujo tosco y en el sonido áspero “kiki”.

Supusimos que este tipo de cartografía entre dominios es análogo a las metáforas y seguramente involucra circuitos neuronales semejantes a los del sistema especular. En línea con esa conjetura, descubrimos que los niños con autismo fallan en la prueba buba/kiki; emparejan formas y sonidos de modo erróneo.

Pero, ¿qué parte del cerebro humano interviene en esa capacidad? Podría ser muy bien el giro angular, que se aloja en la encrucijada de los centros cerebrales de visión, audición y tacto. Y no sólo por su situación estratégica, sino también porque en él se han identificado células nerviosas con propiedades parecidas a las de las neuronas espejo. Cuando estudiamos sujetos no autistas con lesión en ese área del cerebro, vimos que muchos de ellos fallaban en la prueba buba/kiki. Mostraban, además, una dificultad excesiva en la comprensión de metáforas, igual que los que padecen autismo. Tales resultados dan a entender que la cartografía entre dominios podría haberse desarrollado, en su origen, para ayudar a los primates en tareas motrices complejas (que exigen la asimilación presta de información visual, auditiva y táctil), aunque terminó por evolucionar hacia la capacidad de elaborar metáforas. Gracias a las neuronas especulares, los humanos alcanzan las estrellas, ya no simples cacahuetes.

Reparar los espejos

El descubrimiento de deficiencias en las neuronas espejo de las personas con autismo abre nuevas vías para la diagnosis y el tratamiento de este trastorno. Por ejemplo, los médicos utilizarían la no supresión de la onda mu (o quizás el no saber imitar a una madre que saca la lengua) como un instrumento de diagnóstico para la detección del autismo en la primera infancia, con miras a iniciar lo antes posible las terapias conductuales. Resulta esencial que la intervención sea oportuna; la eficacia de las terapias conductuales se reduce si éstas comienzan cuando ya han aparecido los síntomas principales del autismo (entre los dos y los cuatro años de edad).

Una posibilidad aún más tentadora consistiría en utilizar una realimentación biológica para tratar el autismo o al menos suavizar sus síntomas. Bajo riguroso control médico, se presentarían en pantalla ante un niño autista las ondas mu de su EEG. Si el niño tiene dormidas, mas no perdidas del todo, las funciones de las neuronas espejo, quizá sea posible que recupere esa capacidad haciéndole aprender —por prueba y error, y realimentación visual— lo que debe hacer para que las ondas mu desaparezcan de la pantalla. Pineda ahonda en esta vía. Sus resultados preliminares parecen prometedores. Dichas terapias, sin embargo, deberían complementar, que no sustituir, a las de adiestramiento conductual tradicionales.

Otro enfoque terapéutico novedoso se apoyaría en la corrección de los desequilibrios químicos que incapacitan las neuronas espejo de los autistas. Nuestro grupo (al que se han sumado los doctorandos Mikhi Horvath y Mary Vertinsky) ha sugerido que neuromoduladores especializados podrían potenciar la actividad de las neuronas espejo implicadas en las respuestas emocionales. De acuerdo con esta hipótesis, el agotamiento parcial de tales sustancias explicaría la carencia de empatía emocional propia del autismo.

Deben buscarse, pues, sustancias que estimulen la emisión de neuromoduladores o que remeden sus efectos sobre las neuronas especulares. Un candidato es el MDMA (más conocido como “éxtasis”); este

compuesto ha demostrado ser impulsor de la proximidad y la comunicación emocionales. Quizá pueda desarrollarse, a partir del MDMA, un tratamiento eficaz y sin riesgo que atempere al menos alguno de los síntomas del autismo.

Sin embargo, estos tratamientos brindarían sólo un alivio parcial, dado que la hipótesis de las neuronas espejo no explica otros síntomas del autismo; por ejemplo, las estereotipias motoras repetitivas como mecerse de delante a detrás, la elusión del contacto visual, la hipersensibilidad y la aversión a ciertos sonidos. En un intento de determinar de qué modo se producen tales síntomas secundarios, nuestro grupo, en colaboración con William Hirstein, del Colegio Elmhurst, y Portia Iversen, de Curar el Autismo Ahora, fundación no lucrativa de Los Angeles, ha desarrollado la teoría del paisaje resaltado.

Cuando miramos a nuestro alrededor, recibimos una avalancha de información sensorial: vistas, sonidos, olores, etcétera. Tras ser procesadas en las áreas sensoriales del cerebro, estas informaciones se transmiten a la amígdala, que actúa como portal para el sistema límbico regulador de las emociones. Con base en los conocimientos almacenados por el individuo, la amígdala determina la respuesta emocional: miedo, alegría, placer, indiferencia, etcétera. Una serie de mensajes desciende desde la amígdala al resto del sistema límbico; finalmente llega al sistema nervioso reflejo, que prepara el cuerpo para actuar.

Si el individuo se enfrenta a un atracador, por ejemplo, su corazón late más deprisa y su cuerpo transpira para disipar el calor producido por el esfuerzo muscular. A su vez, esta excitación refleja se realimenta al cerebro y amplifica la respuesta emocional. Con el tiempo, la amígdala crea un "mapa topográfico" mental que detalla el significado emocional de todo lo que pertenece al entorno del individuo.

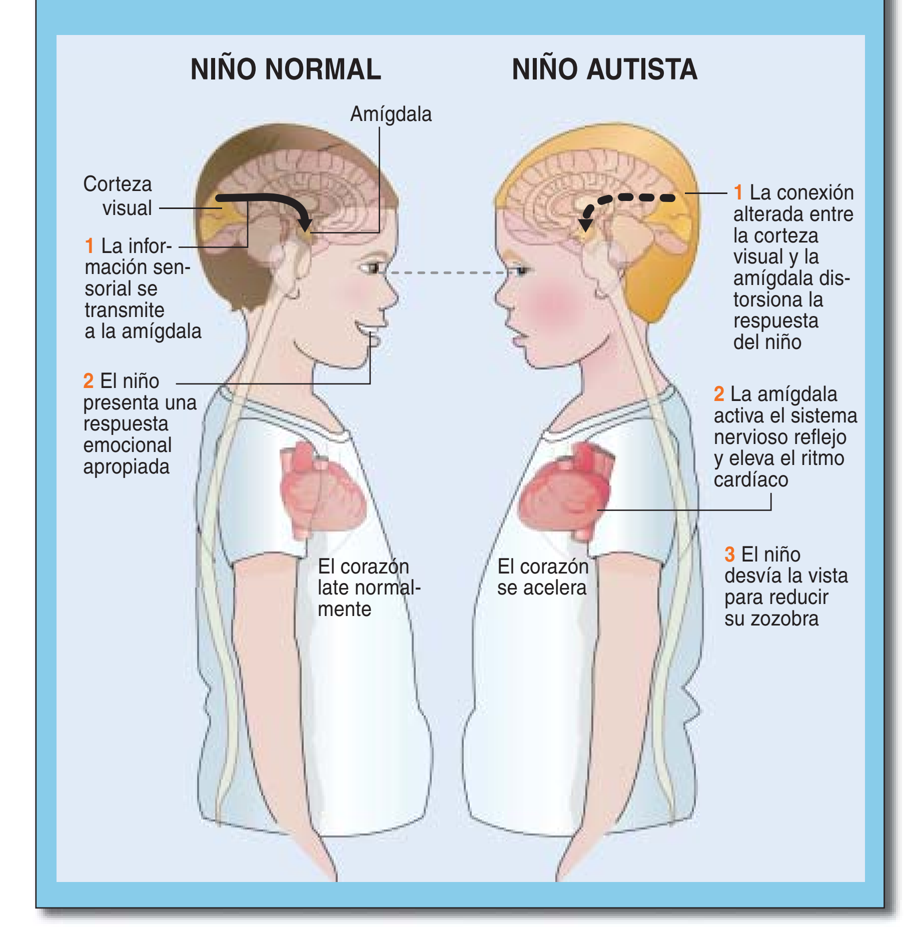
Nuestro grupo decidió explorar la posibilidad de que los niños autistas sufrieran distorsiones en su mapa topográfico, quizá por tener alteradas las conexiones entre las áreas corticales que procesan la información sensorial recibida y la amígdala, o entre las estructuras límbicas y los lóbulos frontales que regulan el comportamiento resultante. Debido a esas conexiones anormales, cualquier evento u objeto trivial podría desencadenar en la mente infantil una respuesta emocional radical, una tormenta en el sistema reflejo. Esta hipótesis explicaría que los niños con autismo eludan el contacto visual y cualquier otra sensación nueva que pueda trastornar su mente. La percepción distorsionada del significado emocional justificaría también que muchos niños autistas se obstinen por bagatelas (horarios de trenes, por ejemplo) y en cambio muestren nulo interés por cosas que entusiasman a la mayoría de sus coetáneos.

Encontramos apoyo a nuestra tesis al observar las respuestas reflejas en un grupo de 37 niños afectados de autismo. Medíamos el aumento de la conductancia dérmica que produce el sudor. En contraste con los sujetos de referencia, los autistas presentaban un nivel general mayor de excitación refleja. Aunque se agitaran ante la presencia de objetos y sucesos triviales, a menudo desatendían estímulos que provocaban respuestas esperadas en el grupo de control.

¿Qué causaría tamaña distorsión en la topografía mental de un niño? Se ha descubierto que casi la tercera parte de los muchachos autistas han sufrido epilepsia del lóbulo temporal

TEORIA DEL PAISAJE RESALTADO

Con el fin de explicar algunos síntomas secundarios del autismo —hipersensibilidad, huída del contacto visual o aversión a ciertos sonidos— se ha elaborado la teoría del paisaje resaltado. En un niño corriente, la información sensorial se retransmite a la amígdala, puerta de acceso al sistema límbico regulador de las emociones. Con base en los conocimientos almacenados, la amígdala determina cómo debe el niño responder emocionalmente a cada estímulo; crea así un mapa "topográfico" mental del entorno. Si el niño es autista, en cambio, las conexiones entre las áreas sensoriales y la amígdala pueden estar alteradas; ello ocasiona respuestas emocionales extremas a sucesos y objetos triviales.



LUCY READING-IKKANDA

en la infancia (una proporción quizá muy superior puesto que muchos ataques epilépticos pasan inadvertidos). Producidos por repetidas descargas erráticas de impulsos nerviosos a través del sistema límbico, los ataques terminarían por desordenar las conexiones entre la corteza visual y la amígdala, potenciando unas y debilitando otras de un modo indiscriminado.

En los adultos, la epilepsia del lóbulo temporal da lugar a espectaculares trastornos emocionales, si bien no repercute drásticamente en la cognición; en los niños, en cambio, los ataques pueden conducir a una discapacidad profunda.

Y lo mismo que el autismo, el riesgo de epilepsia del lóbulo temporal en niños parece condicionado por factores genéticos y ambientales. Ciertos genes, por ejemplo, harían al niño más vulnerable a las infecciones víricas, que a su vez le predispondrían a los episodios epilépticos.

Nuestros hallazgos sobre las respuestas reflejas podrían ayudar a interpretar una vieja observación clínica: en ocasiones, una fiebre alta alivia de forma transitoria los síntomas de autismo. El sistema nervioso reflejo participa en el control de la temperatura corporal; al ser unas mismas vías neuronales las que regulan fiebre y trastornos emocionales del autismo, quizás el acceso febril mitigue las alteraciones citadas.

La teoría del paisaje resaltado podría aportar una explicación sobre las estereotipias motoras y los cabezazos de los niños con autismo; esta conducta de autoestimulación podría amortiguar las tormentas del sistema reflejo en tales sujetos. Hemos comprobado que la autoestimulación produce no sólo un efecto calmante, sino también una reducción mensurable de la conductancia de la piel. Ello sugiere una posible terapia sintomática del autismo. En la actualidad, Hirstein desarrolla un dispositivo portátil que controlaría la conductancia dérmica de un muchacho autista: la detección de una excitación del sistema reflejo activaría un "chaleco a presión" que ejercería sobre el cuerpo del niño una presión suave y relajante.

No hay contradicción entre nuestras dos teorías explicativas de los síntomas del autismo: disfunción de las neuronas espejo y distorsión del mapa topográfico mental (teoría del paisaje resaltado). El mismo suceso que distorsiona la topografía mental de un niño (mediante la alteración de las conexiones entre el sistema límbico y el resto del cerebro) podría lesionar también las neuronas espejo. O quizás el trastorno de las conexiones límbicas corresponda a un efecto lateral de los mismos genes que provocan disfunciones en el sistema neuronal especular.

Se necesitan nuevos experimentos para someter a prueba ese elenco de conjeturas. Todavía está por descubrir la causa final del autismo, pero entre tanto nuestras propuestas podrían ofrecer un marco para las investigaciones futuras.

Los autores

Vilayanur S. Ramachandran dirige el Centro para el Cerebro y la Cognición de la Universidad de California en San Diego. Amén de las relaciones entre el autismo y el sistema neuronal especular, se ha ocupado también de los miembros fantasma y la sinestesia. **Lindsay M. Oberman** trabaja en el laboratorio de Ramachandran desde 2002.

Bibliografía complementaria

AUTONOMIC RESPONSES OF AUTISTIC CHILDREN TO PEOPLE AND OBJECTS. William Hirstein, Portia Iversen y Vilayanur S. Ramachandran en *Proceedings of the Royal Society of London B*, vol. 268, págs. 1883-1888; 2001.

EEG EVIDENCE FOR MIRROR NEURON DYSFUNCTION IN AUTISM SPECTRUM DISORDERS. Lindsay M. Oberman, Edward M. Hubbard, Joseph P. McCleery, Eric L. Altschuler, Jaime A. Pineda y Vilayanur S. Ramachandran en *Cognitive Brain Research*, vol. 24, págs. 190-198; 2005.

A BRIEF TOUR OF HUMAN CONSCIOUSNESS. Nueva edición. Vilayanur S. Ramachandran. Pi Press, 2005.

Proteínas SNARE

El corazón de la maquinaria de fusión intracelular

El interior de una célula está separado del medio circundante por una capa lipídica, la membrana plasmática. Además de esta membrana, las células eucariotas poseen membranas lipídicas internas que demarcan diversos compartimentos intracelulares: el retículo endoplasmático, el aparato de Golgi y los lisosomas, entre otros. Los compartimentos se hallan especializados en la ejecución de determinadas funciones; por ejemplo, en reacciones metabólicas o en hidrólisis de proteínas.

La presencia de tales orgánulos y su especialización funcional constituyen características fundamentales de las células eucariotas, que las distinguen de las células procariotas como las bacterias. Las ventajas evolutivas que ofrecen los compartimentos se reflejan en la gran variedad de células eucariotas que existen en la naturaleza, de levaduras a neuronas.

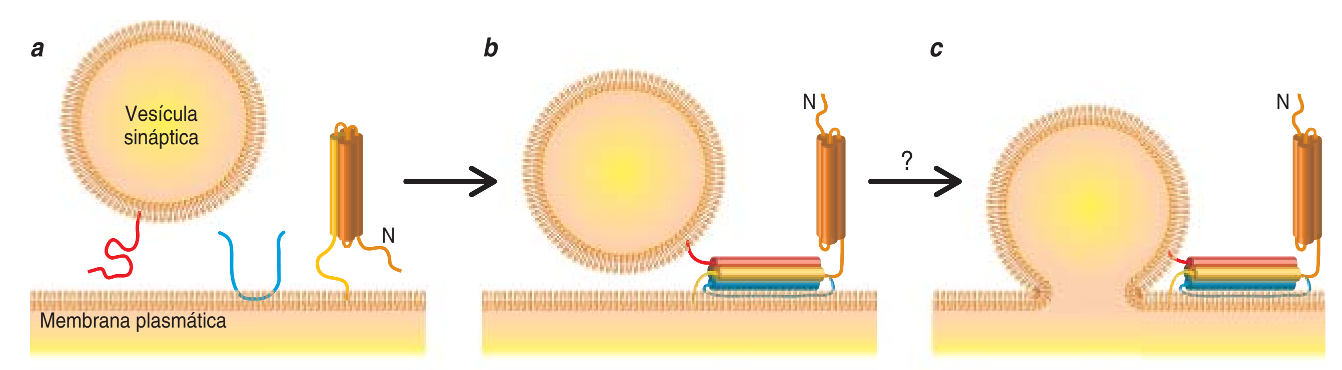
En su mayoría, las funciones específicas de cada compartimento intracelular son ejecutadas por proteínas que residen en su interior o en la membrana. Se requiere, pues, el transporte de estas proteínas, y de sus sustratos, hasta los compartimentos correspondientes. Transporte que corre a cargo de vesículas lipídicas que se forman en un compartimento y se fusionan en otro. Proteínas que han de residir en la membrana del aparato de Golgi se sintetizan en los ribosomas y se insertan, primero, en la membrana del retículo endoplasmático; luego, se "empaquetan" en vesículas que se forman en el retículo endoplasmático; por fin, las vesículas se fusionan con la membrana del aparato de Golgi.

Mecanismos similares operan en otros procesos. Por ejemplo, en la secreción al medio extracelular de moléculas pequeñas con funciones diversas. Pensemos en la liberación de neurotransmisores, proceso crucial para la comunicación entre neuronas y, por tanto, crítico para el funcionamiento del cerebro. Los neurotransmisores se empaquetan a concentraciones elevadas dentro de vesículas lipídicas en las terminales presinápticas de las neuronas; se liberan luego mediante la fusión de estas vesículas con la membrana plasmática (exocitosis). Los neurotransmisores liberados se unen, por fin, a receptores alojados en las membranas de otras neuronas próximas, lo que inicia una señal en las mismas. Estos y otros ejemplos demuestran que los procesos de fusión de membranas intracelulares constituyen una parte fundamental de la biología de las células y los organismos eucariotas.

Una serie de investigaciones en campos muy diversos, acometidas en el transcurso de los dos últimos decenios, han conseguido la identificación de numerosas proteínas que controlan la fusión de membranas en distintos compartimentos intracelulares. En la misma línea, han demostrado que la mayoría de los procesos de fusión de membranas intracelulares están controlados, en parte, por familias de proteínas homólogas, lo que induce a pensar en la existencia de un mismo mecanismo básico de fusión de membrana en la mayoría de los compartimentos.

Aunque todavía estamos lejos de entender los pormenores de este mecanismo básico, se ha avanzado en la comprensión de la función de algunas de estas familias de proteínas homólogas. En particular, las proteínas SNARE (de "soluble N-ethylmaleimide sensitive factor attachment protein receptor"). Estas proteínas se caracterizan por contener en su estructura secuencias que tienden a formar hélices alfa: los motivos SNARE.

En buena medida, lo que sabemos de las proteínas SNARE se debe a la investigación sobre la sinaptobrevina, la sintaxina y la SNAP-25 ("synaptosomal associated protein



Mecanismo hipotético de fusión de membranas mediada por el complejo proteico SNARE. Cada panel corresponde a una de las etapas del proceso de neurotransmisión. La sinaptobrevina (*rojo*) reside en las vesículas sinápticas; la SNAP-25 (*azul*) y la sintaxina (*amarillo y naranja*) se alojan en la membrana plasmática. En la sintaxina aislada, la región N-terminal (*naranja*) está ligada al motivo SNARE (*amarillo*) en una conformación cerrada (*a*). La creación del complejo SNARE mediante la unión de cuatro motivos SNARE (cuatro hélices representadas por los cuatro cilindros) aproxima a las dos membranas entre sí (*b*). Según esta hipótesis, basta para provocar la fusión de las membranas (*c*).

of 25 kDa"). Son proteínas SNARE que controlan la liberación de neurotransmisores. Crean, además, un complejo muy estable, el complejo SNARE ("core complex", en inglés), que consta de cuatro motivos SNARE (dos de SNAP-25, uno de sintaxina y uno de sinaptobrevina) en forma de cuatro hélices paralelas. Los motivos SNARE de la sinaptobrevina y de la sintaxina son adyacentes a sus secuencias transmembrana, que están ancladas en las vesículas sinápticas y en la membrana plasmática, respectivamente. Por tanto, la formación del complejo SNARE acerca las dos membranas entre sí.

A tenor de estas observaciones, se pensó que la formación del complejo SNARE podría instar la fusión de la membrana. Se le atribuyó incluso el mecanismo fundamental de fusión de membranas intracelulares. Por una razón: en la mayoría de los compartimentos intracelulares se alojan proteínas homólogas a sinaptobrevina, sintaxina y SNAP-25.

Los experimentos realizados con proteínas reconstituidas en vesículas sintéticas sugirieron que las proteínas SNARE causaban por sí solas la fusión de membranas. Muchos biólogos aceptaron ese modelo de fusión. Pero los experimentos presentaban numerosos defectos técnicos que sólo descubrieron los expertos en biofísica de membranas. Hoy se debate la validez de la hipótesis.

En mi opinión, está claro que en la fusión de membranas *in vivo* intervienen varias proteínas adicionales. Importa, pues, determinar la función de estas otras proteínas para establecer el mecanismo en cuestión. Parece también demostrado que el complejo SNARE se halla en el corazón de la maquinaria de fusión, puesto que la mayoría de las proteínas con una función importante en la liberación de neurotransmisores interaccionan con las proteínas SNARE y parecen dedicadas, al menos en parte, a regular la formación del complejo SNARE.

En nuestro laboratorio hemos demostrado que la sintaxina cuenta con una secuencia N-terminal que forma tres hélices alfa y que interacciona intramolecularmente con el motivo SNARE en la sintaxina aislada, creando una "conformación cerrada" que se abre para formar el complejo SNARE. Varias son las proteínas que regulan la transición de la sintaxina (de cerrada a abierta); por ello esa transición parece clave para el mecanismo de neurotransmisión.

En resumen, aunque todavía nos hallamos lejos de entender el mecanismo de fusión de las membranas intracelulares, el descubrimiento de las proteínas SNARE y la caracterización del complejo SNARE constituye un paso fundamental hacia la futura comprensión del mismo. La elucidación del mecanismo de fusión y de las distintas formas de regulación que operan en los compartimentos celulares repercutirá en campos muy diversos; entre ellos, la neurología y el desarrollo de terapias para enfermedades relacionadas con defectos de secreción (hipertensión y enfermedades cardiovasculares) y de división celular (cáncer).

JOSEP RIZO
Dptos. de Bioquímica y Farmacología
Centro Médico de la Universidad
Sudoccidental de Texas
Dallas, Texas, EE.UU.

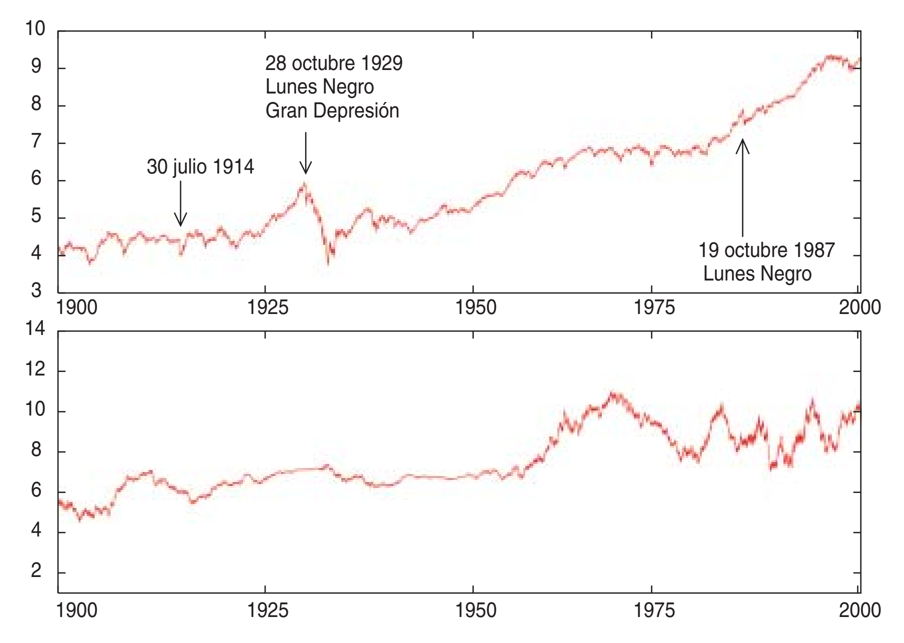
La dinámica de la Bolsa

Una mirada desde la física y la economía

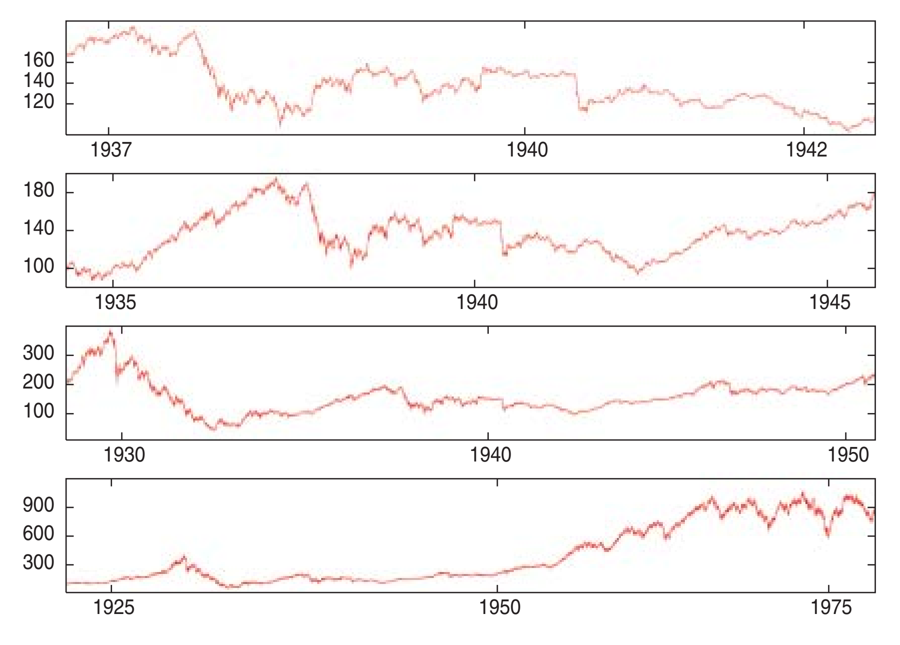
La bolsa gira en torno a los conceptos de riesgo y probabilidad. Hace siglos que la ciencia analiza estas nociones, a las que ha dado forma matemática, y sus consecuencias. Hay, pues, espacio en la ciencia para el estudio del comportamiento de los mercados. Siquiera a vista de pájaro, expondremos el avance histórico en el conocimiento de los mercados financieros, cuyos movimientos a lo largo del tiempo se han ido dibujando con un detalle cada vez mayor.

Aparte de los juegos de azar, muy populares en la Italia del siglo XV, una de las aplicaciones tempranas de la teoría de la probabilidad fue el mercado de las flores y el comercio con las Indias en la Amsterdam del siglo XVII.

Cinco años antes de que Einstein propusiera la correcta explicación del movimiento browniano, el matemático francés Louis Bachelier, en su tesis doctoral *Théorie de la spéculation* (1900), propuso un modelo similar al de Einstein, aunque para la "evolución de los valores bursátiles". Su idea consistía en sintetizar la gran complejidad de las motivaciones



1. Evolución temporal de un precio especulativo. Gráfico de precios bursátiles construido mediante el modelo de Einstein-Bachelier (*abajo*). El gráfico superior nos muestra la evolución diaria real del índice Dow-Jones durante todo el siglo XX. Las flechas indican las bajadas célebres de la bolsa (los años 1914, 1929 y 1987).



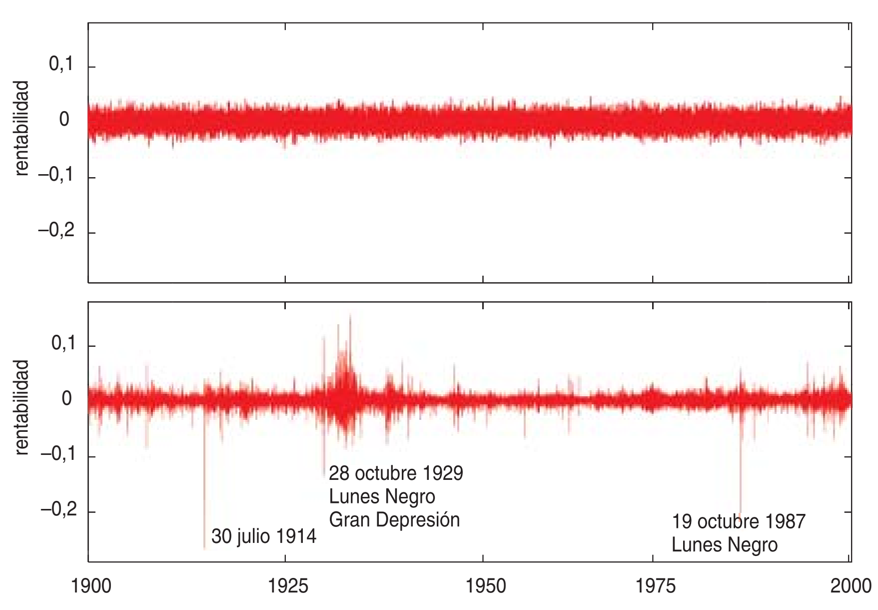
2. Evolución del índice Dow-Jones durante cinco años (*figura superior*), diez años, veinte años y cincuenta años (*figura inferior*). Obsérvese la similitud, que nos indica claramente la propiedad fractal (autosimilar) de los caminos.

humanas escondidas en los mercados mediante un proceso llamado de ruido blanco, gaussiano o de difusión. Ya que no conocemos cómo cambian los precios, pensó Bachelier, vamos a suponer que las variaciones son completamente aleatorias y sin memoria. Precisamente eso mismo fue lo que pensó Einstein de las partículas brownianas: ya que no podemos saber la trayectoria exacta de las partículas, supondremos que están sometidas a una fuerza aleatoria. Detrás de una hipótesis así subyace la convicción de que todos los agentes son iguales y poseen idéntica información.

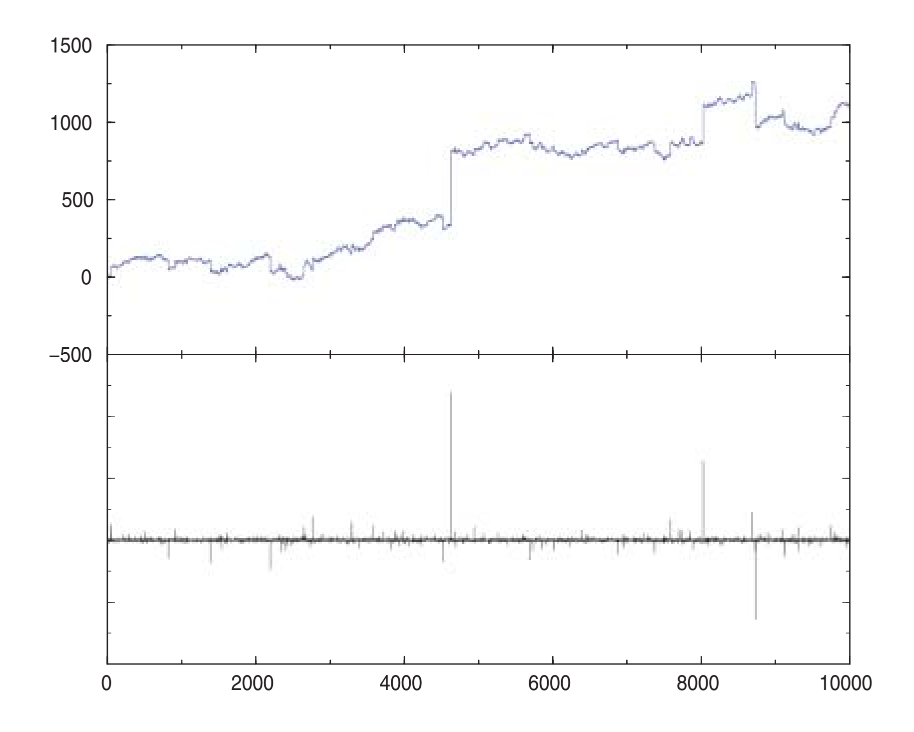
Comprobamos la validez de la teoría de Bachelier con dibujos de las series temporales reales y de las artificiales confeccionadas a partir de su hipótesis. En los gráficos de la figura 1, donde representamos la evolución temporal de un precio especulativo, no encontramos diferencias destacables entre el modelo teórico de Bachelier (*gráfica inferior*) y la realidad. La figura 2 corrobora también la idoneidad del modelo. Si miramos los precios en ventanas temporales de diferente tamaño, no percibiremos grandes diferencias: la autosimilaridad o fractalidad está presente en el modelo de Bachelier-Einstein. Sin embargo, la comparación entre las dos gráficas de la figura 3 nos obliga a frenar el entusiasmo. En ellas no representamos el precio, sino la rentabilidad diaria (el logaritmo del cambio relativo del precio entre ayer y hoy). Observamos un aspecto diferente: las fluctuaciones son más anchas de lo previsto.

Perseveramos en la voluntad de encontrar una serie artificial más realista. Desde comienzos de los años sesenta, se han venido proponiendo diversos modelos que se acercan más al comportamiento real del mercado y acentúan la anchura de las fluctuaciones en la rentabilidad, modulada por la "volatilidad" de los valores: ¡los picos de volatilidad son capaces de generar grandes caídas —*crashes*— o burbujas con cambios diarios en la cotización superiores al 10 %! El primer paso en la dirección de incorporar esas grandes oscilaciones fue dado por Benoît Mandelbrot, considerado padre de los fractales. Los mercados fueron uno de los primeros sistemas a los que aplicó un proceso fractal o autosimilar (*véase la figura 4*). Propuso cambiar la fuerza aleatoria gaussiana por un proceso que permite saltos muy grandes y sin memoria. Aun con eso, la figura 4 nos dice que éste tampoco es un modelo del todo satisfactorio: la volatilidad es con él demasiado brutal; afortunadamente, los mercados se comportan de una forma más tranquila.

Miremos y comparemos con redoblada atención los gráficos. Otra diferencia entre los datos reales y los modelos hasta ahora mencionados es la estrecha correlación entre días volátiles, entre los picos más pronunciados: la volatilidad se agrupa en períodos; los mercados reales presentan una estructura interna más evolucionada que la prevista. Hay un



3. Representación del modelo Einstein-Bachelier. La figura superior representa la serie sintética de los cambios instantáneos de la rentabilidad, sin tendencia. En la figura inferior también se representan estos cambios instantáneos, si bien para la serie real del índice Dow-Jones, de 1900 hasta 2000. Nótese la presencia de picos más agudos, así como un gran agrupamiento de la volatilidad.



4. Modelo de Mandelbrot de un mercado financiero gobernado por un proceso de Lévy (el cambio continuo de la magnitud en cuestión, con saltos independientes de lo que haya ocurrido antes pero sujetos a una misma distribución probabilística). Los picos son demasiado pronunciados y no se observa el agrupamiento de la volatilidad. Los números de los ejes representan el tiempo medido en una unidad arbitraria (días, por ejemplo). En la mitad superior se representa la evolución de un precio de activos y en la inferior el cambio relativo correspondiente.

toma y daca entre las sorpresas y las regularidades; los períodos de volatilidad alta alternan con otros de volatilidad baja.

Parece, pues, necesario buscar un modelo todavía mejor. Al principio de los años ochenta, Robert Engle, nobel de Economía, y otros propusieron una familia de modelos, denominados con el acrónimo GARCH. Sobre todo a causa del *crash* del 19 de octubre de 1987, se generalizó esta clase de modelos mediante los modelos de volatilidad estocástica, donde la volatilidad es una variable que cambia aleatoriamente a lo largo del tiempo.

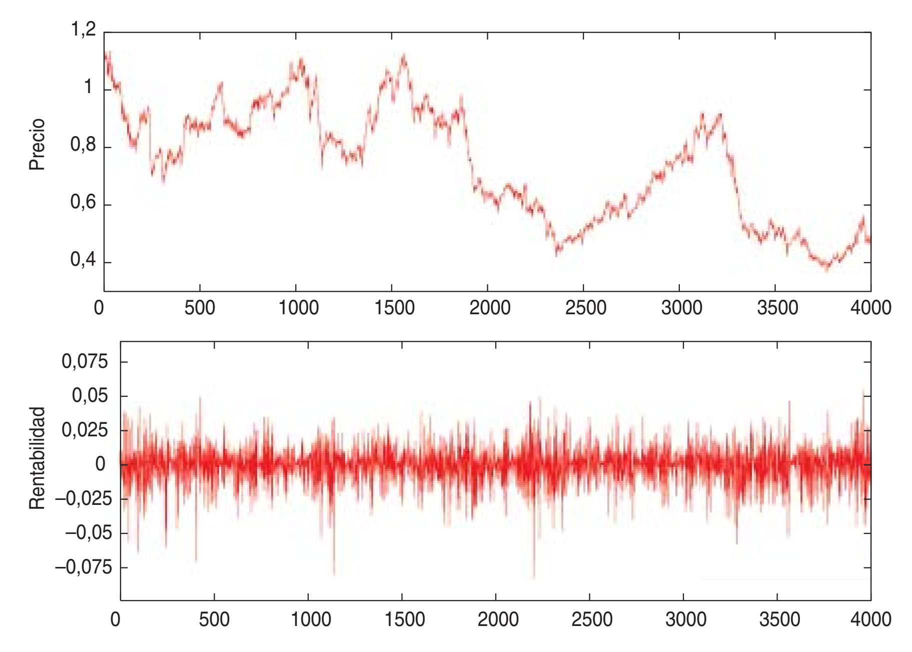
Esta familia de modelos se propone captar una reacción que nos podemos imaginar bastante bien: los días más volátiles, con grandes variaciones de precio, provocan en los operadores del mercado decisiones frenéticas, que a la vez alimentan más volatilidad en los días siguientes. A diferencia de los modelos anteriores de Bachelier y de Mandelbrot, donde sólo había una variable aleatoria, ahora tenemos dos: la rentabilidad y la volatilidad, ambas gaussianas.

Estos modelos proporcionan una explicación bastante satisfactoria del comportamiento del mercado, tanto respecto a los picos de volatilidad como a su agrupamiento y autocorrelación. Como podemos ver en la figura 5, la comparación con los datos reales es bastante buena. Bajo los modelos subyace ahora un comportamiento muy heterogéneo de los agentes, que operan en el mercado con una memoria finita o, si se prefiere, una información parcial del mercado.

Desde la física ha surgido otra clase de modelos, inspirados en la descripción de los fluidos turbulentos. En éstos, la actividad es intermitente: a veces el flujo es calmado y a veces extremadamente violento. Tales modelos son multifractales: tienen muchas escalas de tiempo entrelazadas, que podrían también reflejar la profunda heterogeneidad de comportamientos de los agentes.

Se está procurando retratar con perfeccionismo de orfebre el comportamiento de los mercados financieros. El esfuerzo no termina aquí. Sigue avanzando y nosotros, los autores de este artículo, somos parte de esta andadura. El maridaje de la física con otras disciplinas de matiz más social que las tradicionales aplicaciones tecnológicas está en permanente crecimiento. La bolsa es un buen ejemplo.

JAUME MASOLIVER y JOSEP PERELLÓ
Grupo de Sistemas Estocásticos
y Dinámica Financiera
Facultad de Física,
Universidad de Barcelona



5. Serie de precios sintéticos generada mediante un modelo de volatilidad estocástica. Las unidades de tiempo, del eje horizontal, y precio, del vertical, son arbitrarias.

Alícia Duró

Saetas de mar

Los quetognatos, organismos del plancton, conforman un grupo zoológico (*phylum*). Habitan en todos los mares, desde zonas superficiales hasta las profundidades oceánicas. En 1775, Martin Slabber los denominó gusanos saeta (*sagitta*) en razón de su cuerpo alargado y sus movimientos rápidos. El nombre científico proviene de las largas espinas cefálicas que se alojan en su mandíbula (*chaete* significa "espina" y *gnathos* "mandíbula", en griego). Se conocen unas 115 especies, que se agrupan en 23 géneros.

La mayoría de las especies de quetognatos son transparentes. Otras son translúcidas o contienen algunos pigmentos. Las hay incluso bioluminiscentes. Su cuerpo presenta tres partes bien diferenciadas: cabeza, tronco y cola, con una longitud que oscila entre los 2 y los 120 milímetros. Son nadadores muy activos; a ello contribuyen el hidroesqueleto y la musculatura, además de uno o dos pares de aletas laterales adosadas al cuerpo y de una aleta caudal.

Cuentan con un sistema nervioso complejo. La mayoría de las especies presentan receptores de vibraciones y un par de ojos en la parte dorsal de la cabeza; de ellos se sirven para detectar el alimento. La cabeza está armada por una serie de dientes y de quetas (quitinosas) que facilitan el asimiento de las presas. La boca se encuentra en la parte ventral de la cabeza, donde también se ha detectado la presencia de la neurotoxina TTX (tetrodotoxina). Algunos autores sugieren que los quetognatos utilizan esta sustancia para paralizar a la presa y aumentar así la eficacia de la captura.

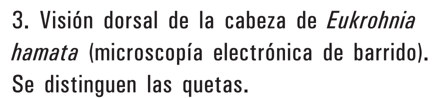
Estas adaptaciones guardan íntima relación con las estrategias de vida. Los quetognatos son depredadores activos. Son más abundantes de lo que se había pensado hasta finales del siglo pasado. Todas las especies son carnívoras; algunas caníbales. A su vez, constituyen el alimento de una amplia variedad de organismos como los peces. Por ambos motivos, ocupan un lugar destacado en las redes tróficas planctónicas. Su biomasa se estima entre el 10 y el 30 por ciento de la de los copépodos en todos los océanos; por tanto, revisten suma importancia para la transferencia de energía hacia niveles tróficos superiores.

CLAUDE CARRE (*abajo y página siguiente, arriba*)

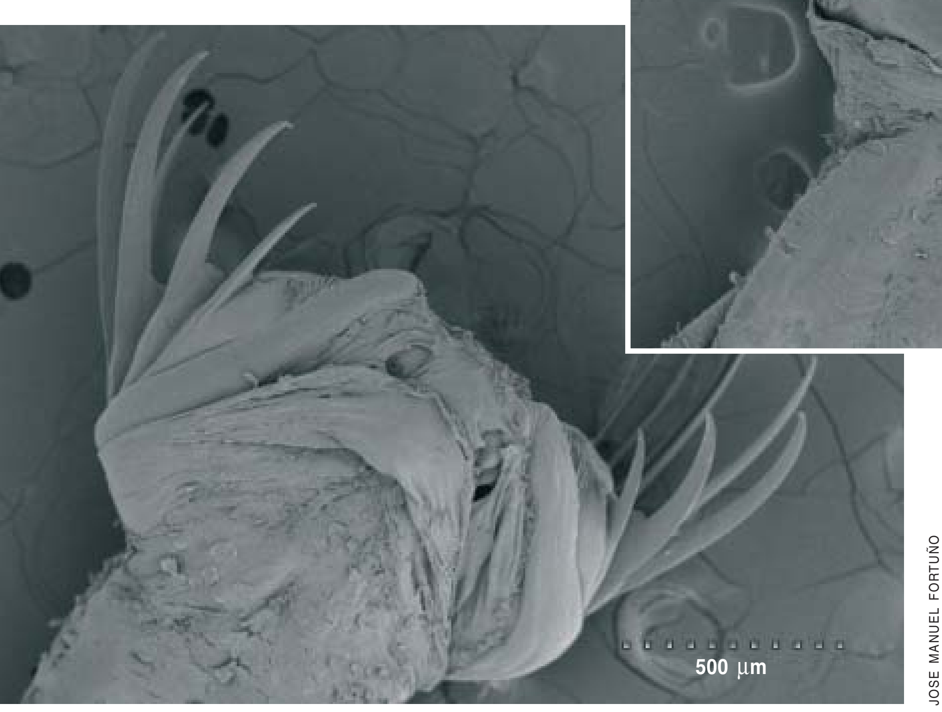


1. Micrografía óptica del quetognato *Sagitta enflata*. Se distinguen la cabeza, el tronco y la cola.

2. *Spadella cephaloptera* presenta sólo un par de aletas laterales. La situación y el número de aletas se utiliza como carácter taxonómico.



3. Visión dorsal de la cabeza de *Eukrohnia hamata* (microscopía electrónica de barrido). Se distinguen las quetas.



500 µm

4. Visión ventral de la cabeza de *Eukrohnia hamata* (microscopía electrónica de barrido). Además de las quetas, se aprecian los dientes y la hendidura de la boca.

JOSE MANUEL FORTUÑO

Jeffrey D. Sachs

Estados de bienestar, más allá de la ideología

¿Son incompatibles impuestos más elevados y sólidos sistemas de protección social con una economía de mercado próspera? Ya tenemos datos para responder

Una de las grandes dificultades del desarrollo sostenible estriba en conciliar dos deseos: la prosperidad y la seguridad. Economistas y políticos llevan décadas debatiendo la forma de compatibilizar el indudable poder de los mercados con la tranquilizadora protección de un sistema de seguridad social. Los partidarios en Estados Unidos de la economía de la oferta sostienen que la mejor manera de que los norteamericanos pobres alcancen el bienestar consiste en estimular un rápido crecimiento económico; y los elevados impuestos necesarios para financiar altos niveles de seguridad social, sigue diciendo su argumento, lastran la prosperidad. El economista de origen austriaco Friedrich August von Hayek, partidario del libre mercado, mantuvo en la década de los cuarenta del pasado siglo que cobrar elevados impuestos suponía un "camino hacia la servidumbre", una amenaza a la libertad misma.

Enturbian el debate en EE.UU. los intereses creados y la ideología. Aun así, hay ahora importantes pruebas empíricas para juzgar estas cuestiones científicamente. Se las encuentra comparando un grupo de economías de mercado relativamente libre, cuyas tasas de impuestos y gasto social son bajas o moderadas, con otro grupo de estados de bienestar social que tienen altas tasas de impuestos y gasto social.

No es una coincidencia que los países con bajos impuestos y altos ingresos sean mayoritariamente de habla inglesa, descendientes históricos directos de la Gran Bretaña del siglo XIX y sus teorías del liberalismo económico: Australia, Nueva Zelanda, Gran Bretaña y EE.UU. Los estados con altos impuestos y altos ingresos son las democracias sociales nórdicas, en concreto Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia, que han sido gobernados por partidos socialdemócratas de centro-izquierda durante la totalidad o la mayor parte del período posterior a la II Guerra Mundial. Combinan un saludable respeto por las fuerzas del mercado con un firme compromiso en luchar contra la pobreza. El desembolso presupuestario con fines sociales que realizan los países nórdicos supone una media de aproximadamente el 27 por ciento de su producto interior bruto (PIB), mientras que en los países de habla inglesa esta proporción sólo alcanza el 17 por ciento del PIB.

Los países nórdicos superan, en promedio, a los anglosajones en la mayoría de los indicadores económicos. Los índices de pobreza son mucho más bajos y los ingresos medios de la población en edad laboral más altos. La tasa de desempleo es más o menos la misma en ambos grupos; sólo un poco mayor en los países nórdicos. El balance presupuestario es mejor en el grupo nórdico, con mayor superávit en proporción al PIB.

Friedrich von Hayek estaba equivocado.

Los países nórdicos tienen varias formas de mantener su dinamismo económico a pesar de los elevados impuestos. En primer lugar, invierten generosamente en investigación y desarrollo y en educación superior. Todos ellos, pero especialmente Suecia y Finlandia, se han incorporado plenamente a la arrasadora revolución de las tecnologías de la información y las comunicaciones, ganando así competitividad global. Suecia invierte actualmente casi el 4 por ciento del PIB en investigación y desarrollo, el porcentaje más alto del mundo; en promedio, las naciones nórdicas invierten un 3 por ciento, mientras que las de habla inglesa sólo en torno al 2 por ciento.

Los estados nórdicos también se han esforzado por mantener un gasto social compatible con un sistema económico abierto, competitivo y de mercado. Los impuestos sobre el capital no son muy altos. Ciertas políticas laborales retribuyen a los trabajadores poco cualificados o a personas a las que de otra forma costaría emplear para que trabajen en el sector servicios, en áreas que son fundamentales para mantener la calidad de vida, como el cuidado infantil, la salud y la asistencia a ancianos y discapacitados.

Los resultados para los hogares que están en la escala más baja de la distribución de ingresos son increíblemente buenos, especialmente en contraste con la mezquina negligencia que pasa por ser la política social estadounidense. El gasto de EE.UU. en servicios sociales para pobres y discapacitados es inferior al de casi todos los países ricos, pero lo barato le sale caro: tiene el índice de pobreza más alto de todos los países ricos y una población penitenciaria desmedida. Desviar el gasto público sanitario hace que al final EE.UU. reciba mucho menos de lo que paga, porque su dependencia de la sanidad privada ha dado lugar a un sistema maltrecho con resultados mediocres a un coste muy elevado.

Von Hayek estaba equivocado. En democracias fuertes y vibrantes, un estado de bienestar social generoso no es un camino hacia la servidumbre, sino más bien hacia la justicia, la igualdad económica y la competitividad internacional.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.



Stuart A. Kauffman

La evolución de la prosperidad futura

Existen analogías entre la evolución de la técnica y la de las especies, pero no se las aprecia como debiera, pese a que en ellas reside la clave del desarrollo

Nadie se rasga las vestiduras por los cambios impredecibles que trae el paso de los siglos: ¿quién podría culpar a los centuriones romanos de no haber previsto la invención de los lanzacohetes? Sin embargo, en plazos mucho más breves ocurren también transformaciones monumentales y asombrosas. Aun a principios de los años ochenta hubiera sido difícil que alguien se atreviese a dar por seguro el auge de Internet y la caída de la URSS. Cambios inesperados sacuden incesantemente el mundo empresarial, pese a todos sus esfuerzos de anticipación y adaptación; de ello dan fe los frecuentes fracasos de los planes quinquenales de las empresas.

Hasta ahora, los economistas no han podido ayudar mucho a las empresas que intentan adaptarse mejor al progreso. Han tardado en darse cuenta de que sus tentativas de elaborar modelos de sistemas económicos se concentran en los que han alcanzado el equilibrio de mercado o avanzan hacia él. En lo que a esto respecta, se han inspirado en el trabajo de los físicos y a menudo han logrado buenos resultados. Así, por ejemplo, fueron físicos de formación quienes formularon el modelo de Black-Scholes, utilizado desde los años setenta para predecir la volatilidad de los precios en la bolsa. Guarda relación con la ecuación termodinámica que describe el calor.

La economía debe fijarse menos en la física y más en la biología.

Sin embargo, como la economía intenta modelizar fenómenos cada vez más complicados, debería desplazar su atención del terreno de la física al de la biología, dado que la biosfera y sus organismos vivos representan los sistemas más complejos de la naturaleza. En particular, conocer con más detalle la adaptación y evolución de las especies quizás ofreciera una visión profunda revolucionaria, incluso, de la capacidad de adaptación empresarial y de los motores del crecimiento económico.

Una de las ideas esenciales de la teoría evolutiva moderna es la preadaptación. Aunque pueda parecer contradictoria, la expresión tiene un significado perfectamente lógico: toda propiedad de un organismo ofrece, además de sus características funcionales obvias, otras que podrían ser útiles de maneras insospechadas en las circunstancias adecuadas. Los pulmones, respiradores de aire, tuvieron sus precursores en las vejigas natatorias con las que los peces mantenían el equilibrio; cuando algunos peces empezaron a acercarse a las orillas, esas vejigas adquirieron una nueva utilidad como depósitos de oxígeno. Los biólogos dicen, pues, que las vejigas natatorias estaban preadaptadas para convertirse en pulmones. La evolución puede aportar innovaciones a través de procesos no preestablecidos y no algorítmicos, configurando y recombinando entidades existentes para nuevos fines —esto es, para que pasen de su función actual a una función nueva contigua—, en vez de idear propiedades a partir de la nada.

La sucesión de propiedades adaptativas de una especie define su nicho ecológico mediante su relación funcional con otras especies. Del mismo modo, todo bien económico ocupa un nicho definido por sus relaciones con bienes complementarios y sustitutivos. A medida que aumenta el número de bienes económicos, crece exponencialmente el número de combinaciones adaptativas de esos bienes, con lo cual se crea la posibilidad de nichos enteramente nuevos. La creación autocatalítica de nichos constituye, por tanto, uno de los principales factores impulsores del crecimiento económico.

Todavía no sabemos por qué unos sistemas son más adaptables que otros, pero el análisis de la complejidad ha ofrecido algunas pistas. Dentro de mi propio trabajo sobre unos sistemas físicos llamados *vidrios de espín,* he apreciado que debe dársele importancia al nivel de control centralizado que se ejerce sobre las partes auxiliares de un sistema. Si el control es excesivo, el sistema se inmovilizará en configuraciones limitadas, y si es laxo, cambiará de modo errático. Sólo aquellos sistemas que se mantengan en la divisoria misma del orden y el caos presentarán la estabilidad y la capacidad generales necesarias para explorar el universo de posibles soluciones ante las dificultades que aparezcan.

El camino hacia la máxima prosperidad dependerá de que se halle el modo de construir sistemas económicos en los que se generen nuevos nichos espontáneamente y en abundancia. Sin duda, este planteamiento de la economía es radical: se basa en el comportamiento emergente de los sistemas más que en un estudio reductivo de los mismos. Desafía los tratamientos matemáticos ordinarios porque no está preestablecido ni es algorítmico. No es de extrañar que la mayoría de los economistas hasta ahora se resistan a aceptar tales ideas. Pero quedan pocas dudas de que, si aprendemos a aplicar estas lecciones de la biología al mundo de la técnica, habremos iniciado una nueva era de innovación y progreso.

Stuart M. Kauffman es profesor de biocomplejidad e informática en la Universidad de Calgary y profesor externo del Instituto de Santa Fe.

Virus para móviles

Mikko Hypponen

Los virus informáticos se propagan ahora por radio. Infectan a teléfonos móviles en todo el mundo. Las empresas de seguridad informática, las operadoras de telefonía móvil y los fabricantes de equipos se aprestan a erradicar estas amenazas antes de que campen sin control

Los expertos lo veían venir desde hace años. Llegó en junio de 2004. El autor y otros investigadores dedicados al estudio de los programas informáticos de intención maligna e incluso delictiva (*malware*) sabían que la aparición de tales programas en la telefonía móvil sería sólo cuestión de tiempo. Los teléfonos móviles, en su evolución, cuentan hoy con la posibilidad de "bajar" programas desde Internet y de compartir sus datos y programas con otros equipos mediante conexiones Bluetooth de corto alcance; asimismo, envían o reciben mensajes multimedia (MMS, de "multimedia messaging service") desde cualquier lugar del mundo y utilizan tarjetas de memoria extraíbles. Pero al adquirir estas nuevas capacidades han quedado al descubierto puntos vulnerables nuevos. Era inevitable que los truhanes descubrieran tales flaquezas y se valieran de ellas por pura maldad, o peor todavía, para beneficiarse de forma delictiva.

Tal como esperaban, los expertos en seguridad informática descubrieron en verano de 2004 el primer programa pernicioso ideado para teléfonos inteligentes ("smartphones"). Este programa, el Cabir, era el clásico virus concebido para demostrar que una idea es realizable y su creador ufanarse de tal engendro. Los equipos infectados no sufrían mayor daño que el agotamiento de la batería, al tratar el virus de hacer copias de sí mismo en otros teléfonos abriendo y buscando conexiones Bluetooth.

El autor, anónimo, y probablemente residente en España, optó por publicar el Cabir en una página de la Red; no quiso dejarlo suelto para que campase a sus anchas. A los dos meses, los burladores de la ley lo habían puesto en libertad en Asia sudoriental. No tardó en difundirse por el ancho mundo.



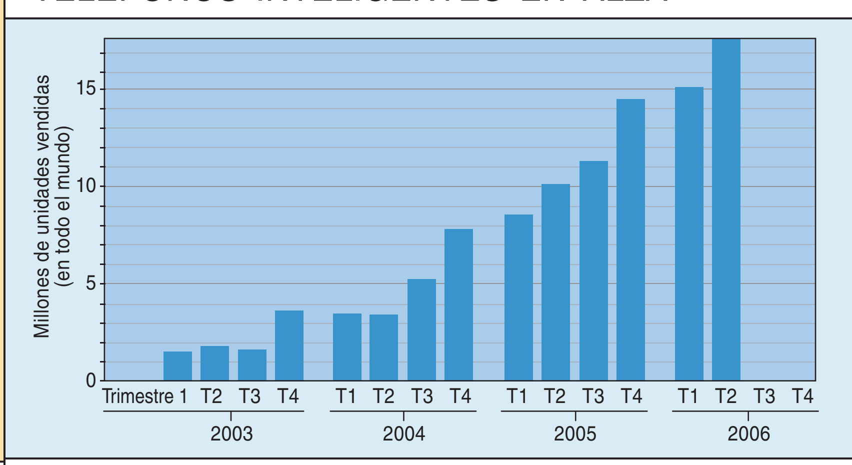

MIRACLE STUDIOS

UN TELEFONO "INTELIGENTE" infectado por virus informáticos podría hacer caer a otros por "efecto dominó".

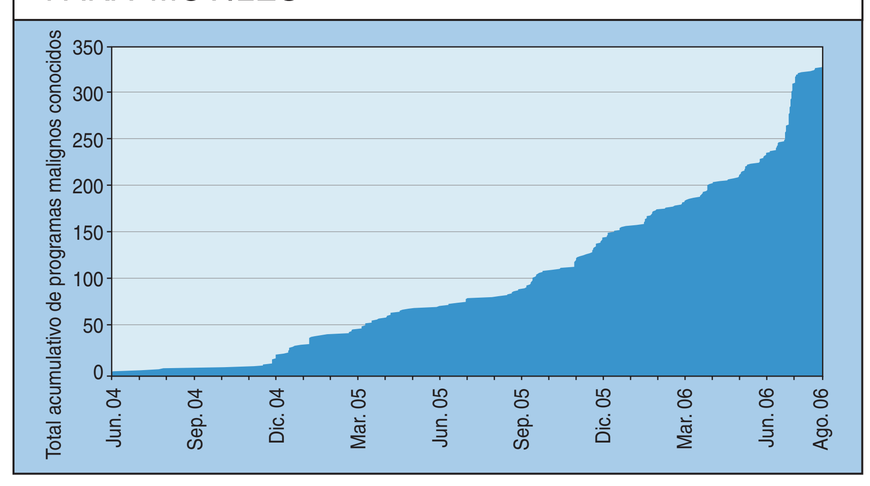
MAS TELEFONOS, MAS DIANAS

El número de móviles "inteligentes" se ha disparado de forma impresionante en todo el mundo durante los últimos años y con ello, parejamente, los programas perversos lanzados en su contra. He aquí parte de la receta para un desastre: al crecer la población de víctimas potenciales, aumenta la posibilidad de que reciba el ataque de programadores malintencionados. Se espera que la población de usuarios se multiplique en los años venideros: según los cálculos, en 2009 se venderán más de 200 millones de teléfonos móviles inteligentes.

TELEFONOS INTELIGENTES EN ALZA



CRECIMIENTO DE LOS VIRUS INFORMATICOS PARA MOVILES



LUCY READING-IKKANDA; FUENTES: CANALYS (*gráfica de arriba*) Y F-SECURE SECURITY RESEARCH (*gráfica de abajo*)

A pesar de que habíamos permanecido en alerta, atentos a la aparición de virus como el Cabir, no estábamos del todo preparados para afrontarlo. En cuanto saltó la alarma, en F-Secure, empresa de seguridad informática, nos aplicamos a inspeccionar el nuevo virus, que era del tipo "gusano". Pero carecíamos de un lugar seguro donde estudiarlo. A diferencia de los virus de los ordenadores, que pueden examinarse y diseccionarse en una máquina aislada, sin conexión a red alguna, los virus inalámbricos se diseminan —y, en ocasiones, hasta dan saltos transoceánicos— en el momento mismo en que el teléfono infectado comienza a operar.

Nos llevamos, pues, cuatro móviles al refugio antiaéreo que tenemos en el sótano del edificio de nuestras oficinas. Antes de encenderlos, pusimos un guardia en la puerta, no fuese que algún empleado entrase confiadamente y se infectase. Pocos meses después, ese mismo año, F-Secure construyó dos laboratorios completamente revestidos de aluminio y cobre, impenetrables a las ondas de radio, para estudiar estas formas contagiosas de programas perversos.

Aunque la versión primitiva de Cabir era hasta cierto punto inocua, no faltaron autores sin escrúpulos que se apresurasen en modificarlo y hacerlo mucho más virulento; otros empezaron a preparar ataques de nuevos tipos. Entre los virus para móviles que hoy campan a sus anchas los hay que inutilizan del todo el teléfono, borran los datos que éste contiene o envían onerosos mensajes a números de pago, de coste elevado. En sólo dos años, el número de virus dirigidos contra teléfonos móviles inteligentes se ha disparado desde uno hasta más de 200, una tasa de crecimiento similar a la de la proliferación de virus informáticos que se produjo tras el lanzamiento del Brain, primer virus para ordenadores personales, en 1986.

A pesar de los hercúleos esfuerzos para embridar los virus contra ordenadores, éstos continúan desbocados: hasta la fecha, se han identificado más de 200.000 programas malignos. Un ordenador sin protección suele quedar infectado pocos minutos después de conectarse a Internet. Los costos económicos de estos 20 años de ataques informáticos han sido muy elevados; aumentan sin cesar debido a que los programas malignos de vieja escuela, redactados sólo para mayor gloria de sus creadores, han dado paso a una

Resumen/Virus telefónicos

- El primer virus contra teléfonos móviles inteligentes golpeó en 2004. Estos dispositivos permiten la instalación de aplicaciones informáticas desde fuentes no tuteladas por la compañía telefónica.
- Existen hoy más de 300 clases de programas perversos dirigidos contra estos aparatos: gusanos, caballos de Troya, otros virus y programas-espía.
- Al propio tiempo que se disparan en todo el mundo las ventas de estos teléfonos tan perfeccionados, se está preparando el escenario para la difusión masiva de los programas informáticos dañinos para móviles. Se están dando pasos para impedir que así suceda, pero las oportunidades de impedir el asalto no durarán mucho tiempo.



nueva era de programas de intención delictiva, diseñados para la difusión de correo basura, la apropiación de datos o la extorsión.

Los programas malintencionados para telefonía móvil, aunque hoy una soportable molestia, podrían a no tardar convertirse en un problema más formidable todavía que los virus informáticos para ordenadores, a menos que los profesionales de la seguridad, los operadores de redes de telefonía móvil, los diseñadores de teléfonos inteligentes y los propios usuarios colaboren y sumen esfuerzos para mantenerlos a raya. La historia de los programas malignos dirigidos contra ordenadores personales resulta humillante, pero ofrece enseñanzas que podrían ayudarnos a prever algunas de las formas en las que los teléfonos pueden ser atacados y a tomar contramedidas.

En marea creciente

En 1988 eran muchos los informáticos que desdeñaron los virus, tomándolos por meras novedades intrascendentes. Esta valoración resultó ser de una ingenuidad lamentable. En el caso de los programas malignos para teléfonos estamos, por así decirlo, en 1988; sólo disponemos de un breve respiro para actuar, si deseamos evitar la repetición de los errores del pasado.

Uno de tales errores consistió en subestimar la rapidez con la que crecería la prevalencia, el refinamiento y la diversidad de los programas perniciosos. La prevalencia depende de la población de posibles hospedadores de patógenos virtuales, así como de la prontitud con la que se transmite la infección. La población diana de los virus para móviles es enorme y aumenta a pasos de gigante: existen ya más de 2000 millones de teléfonos celulares en el mundo.

Cierto es que la mayoría de estos teléfonos han quedado anticuados; funcionan con sistemas operativos cerrados e inaccesibles, de propiedad privada, inmunes, en buena medida, a infecciones víricas. Pero los usuarios están abandonando estos aparatos en favor de teléfonos inteligentes que funcionan con sistemas operativos más abiertos, con navegadores de la Red, correo electrónico y otros clientes de mensajería. Se hallan provistos de lectores de tarjetas de memoria y de transceptores Bluetooth de corto alcance. Cada una de tales prestaciones ofrece un conducto para la propagación de los programas perversos.

El sistema Bluetooth, por ejemplo, permite que ciertos gusanos de móviles se extiendan por mera proximidad entre teléfonos vulnerables, a la manera del virus de la gripe. Un teléfono inteligente equipado con Bluetooth identifica e intercambia archivos con otros dispositivos Bluetooth desde una distancia de 10 metros o más. Las víctimas, al viajar, pueden dejar en pos un reguero de vecinos infectados. Cualquier acontecimiento o espectáculo que atraiga a una muchedumbre ofrece un "caldo de cultivo" perfecto para la crianza de virus basados en Bluetooth.

En 2005, una forma especialmente detestable de Cabir se propagó con tanta prontitud durante los campeonatos mundiales de atletismo, celebrados en Helsinki, que los operadores del estadio tuvieron que hacer destellar avisos de advertencia en una pantalla enorme. La mayoría de los teléfonos inteligentes cuentan con un "modo indetectable" para el sistema Bluetooth, que los protege de la invasión por gusanos. Pero son pocos los usuarios que se sirven de esta función. En la primavera de 2006, mientras daba una conferencia sobre seguridad informática, efectué una rápida exploración de la sala: casi la mitad del público había dejado su teléfono abierto. Tal proporción es mayor todavía entre la población general, por lo que estos equipos ofrecen un vector de inquietante eficacia para la difusión de parásitos invisibles.

Y esta población de hospedadores está creciendo con prontitud. Los teléfonos inteligentes empezaron siendo costosos modelos para directivos, pero desde hace poco su popularidad entre los consumidores ha alzado el vuelo. A cada nueva generación de estos aparatos se le van añadiendo más funciones de las que ofrecen los ordenadores personales. Por otra parte, a la par que estos teléfonos han empezado a exhibir cámaras de vídeo, navegación por GPS o reproductores de MP3, su precio se ha desplomado; ello se debe, en parte, a los subsidios de las operadoras de redes, que confían en que las nuevas capacidades de los aparatos animen a los consumidores a aumentar el gasto en los servicios que ofrecen. El año pasado se vendieron más de 40 millones de teléfonos inteligentes; los analistas confían en que para 2009 serán más de 350 millones las unidades en servicio.

Es posible que, a medio plazo, estos equipos sean adquiridos más rápidamente en países con una economía emergente, donde el parque de ordenadores personales es todavía pequeño. Una investigación efectuada por la empresa Canalys, de Reading, ha mostrado que las ventas de teléfonos inteligentes crecieron, durante el primer trimestre de 2006, a un ritmo doble en Europa oriental, Africa y Oriente Medio que en Europa occidental. No faltan analistas que pronostiquen que algunos países en vías de desarrollo preferirán dejar de lado la construcción de una infraestructura

ABC de los virus

CABALLO DE TROYA
Programa que finge ser útil; en realidad, oculta un código malicioso.

ESPIA
Programas de espionaje (*spyware*); revelan a los fisgones información reservada concerniente al usuario o al sistema informático.

GUSANO
Código autorreplicante; se propaga automáticamente por una red.

SEÑUELO (*PHISHING*)
Intento de timo mediante imitaciones fraudulentas de páginas de la Red, correos electrónicos o mensajes de texto que invitan a revelar contraseñas, claves bancarias u otros datos de índole personal o reservada.

VIRUS
Al principio designaba a segmentos de código que se insertaban en otros programas y se reproducían cada vez que el programa hospedador se ejecutaba. Ahora corresponde a un término polisémico que engloba gusanos, caballos de Troya y otros males.

MIRACLE STUDIOS

ANATOMIA DE UN ATAQUE

Incluso una persona cautelosa puede caer víctima de gusanos para móviles como el CommWarrior. Se han detectado unas 15 variantes de este gusano desde su aparición en marzo de 2005. CommWarrior, que se vale de la interfaz de usuario de Bluetooth, insta a la víctima a instalar en su teléfono el programa maligno. Una vez activo, se disemina rápidamente mediante conexiones Bluetooth, mensajes multimedia (MMS) y tarjetas de memoria.

1 Boris acaba de subir a un autobús. Su teléfono zumba. Otro teléfono del vehículo es portador de CommWarrior.Q, que intenta trasladar una copia de sí mismo al teléfono de Boris por medio de Bluetooth.



2 El teléfono de Boris le advierte que está a punto de recibir un archivo y le pide permiso para aceptar la transmisión.



4 Boris necesita hacer una llamada urgente, de modo que responde "Sí" a la petición de recepción y a las preguntas sobre instalación y seguridad subsiguientes. Su teléfono ha sido infectado. Si Boris introdujese la tarjeta de memoria de su teléfono en otro terminal, para transferir a éste una aplicación, el segundo equipo también quedaría infectado.



5 Comm-Warrior.Q inicia una exploración en busca de otros dispositivos Bluetooth cercanos e intenta copiarse en los que encuentre. En ocasiones logra infiltrarse en varios equipos a la vez.





7 El gusano envía copias MMS de sí mismo a todos los teléfonos móviles del libro de direcciones de Ana, junto con un mensaje astutamente ensamblado a partir de mensajes enviados por Ana en otras ocasiones.



3 Boris, desconfiado, responde “No”. Pero el teléfono no obedece y repite la pregunta. Mientras Boris siga respondiendo “No”, no podrá hacer ninguna llamada, ni enviar mensajes ni utilizar ninguno de los programas del teléfono.





6 Además, cuando Boris le envía un mensaje a Ana, el gusano le envía inmediatamente un archivo multimedia (MMS) que contiene una copia del gusano, renombrado de forma verosímil. Cuando Ana abre el mensaje, su teléfono queda infectado.



8 Cada vez que Ana responde a un mensaje de texto, CommWarrior.Q lo hace seguir con un paquete MMS infectado. El proveedor telefónico de Ana le cobra un cargo por cada mensaje que ella envía. Resultado: una factura espeluznante.

MIRACLE STUDIOS

cableada para Internet; en cambio, potenciarán las redes inalámbricas de transmisión de datos y promocionarán los teléfonos inteligentes para operar como ordenadores personales de poco precio. La construcción y el mantenimiento de una red inalámbrica resultan más económicos y sencillos; la supervisión y el control —desde el punto de vista de la censura—, más fáciles.

Si se cumplen tales pronósticos, los teléfonos inteligentes vendrían a ser, en un futuro muy cercano, la mayoría de los ordenadores del mundo. Grandes colectivos de usuarios, con escasa o nula experiencia en informática, pronto “surfearían” por la Red y compartirían archivos entre sus teléfonos. Ofrecerían así a los creadores de programas maliciosos una población diana desprevenida y de tamaño irresistiblemente grande.

Los virus para ordenadores personales nos han enseñado una lección: cuanto mayor es la diana, más atractiva les resulta a los programadores malintencionados. La inmensa mayoría de los virus para ordenadores de sobremesa opera sólo en el ubicuo sistema operativo Windows de Microsoft. Por la misma razón, casi todos los gusanos y caballos de Troya que se han lanzado hasta ahora están concebidos para infectar el sistema operativo Symbian, instalado en alrededor del 70 por ciento de los teléfonos inteligentes del mundo (los de Nokia, Samsung, Sony Ericsson y Motorola entre otros). En cambio, sólo unas pocas variedades infectan a los sistemas PocketPC o Windows Mobile, al Treo de Palm, o al Research de los aparatos BlackBerry de Motion.

El sesgo hacia el sistema Symbian explica en parte la razón de que los virus para móviles sean más comunes en Europa y en el sudeste asiático, donde el Symbian es cosa corriente, y, en cambio, más raros en América del Norte, Japón y Corea del Sur. Las telefónicas estadounidenses han repartido por un igual sus mercados entre las distintas plataformas. Los mercados japonés y coreano estuvieron largo tiempo dominados por teléfonos basados en Linux; los transportistas de señal de esos países restringen la pluralidad de tipos de aplicaciones que los usuarios pueden instalar en su teléfono.

A los transportistas de señal les convendría empezar a educar a los actuales usuarios de teléfonos celulares para que aprendan a identificar y evitar los virus para móviles, en vez de esperar a que estas infecciones se tornen epidémicas. Los fabricantes de teléfonos deberían instalar programas antivirus ya “de serie”. Los organismos reguladores y las compañías telefónicas contribuyen también a evitar el problema del “monocultivo”, que tanto perjudica a los ordenadores, incentivando para los teléfonos inteligentes un ecosistema variado, donde no haya una variedad de soporte lógico (*software*) que monopolice el mercado.

De la jactancia al delito

La diversidad es un arma de doble filo, claro está. Inevitablemente, los programas malignos, con el tiempo, mutarán en especies nuevas que atacarán y pervertirán los programas útiles en una gama de formas cada vez más diversa. A los virus primitivos para ordenadores acabaron por sumarse troyanos, gusanos, programas espía y, últimamente, ataques con correos señuelo (*phishing*). Desde 2003, una fracción significativa de los programas malignos para ordenadores se han escrito en busca de un provecho y no por pura maldad. Hoy operan en todo el mundo bandas organizadas de ciberdelincuentes. Estos facinerosos se valen de aplicaciones delictivas para hacerse con dinero ajeno mediante el robo de datos financieros o claves bancarias, información privilegiada, secretos industriales o recursos informáticos. Los difusores de correo basura (*spammers*) reúnen “botines internáuticos”, conjuntos de máquinas que manipulan para lanzar grandes volúmenes de correo electrónico o promover timos basados en páginas señuelo. Otros extorsionan a las empresas amenazándolas con la destrucción de sus datos o el bloqueo de sus servicios de correo o de sus sedes en la Red. En algunos países, los ciberdelincuentes son prácticamente intocables, porque las autoridades carecen de los conocimientos técnicos, los recursos e incluso el deseo de imponer leyes contra los delitos informáticos.

Conforme aumenta la elaboración de virus concebidos con ánimo de lucro, la probabilidad de que se produzcan ataques serios se multipli-

ca también. Después de todo, cada llamada telefónica y cada mensaje de texto o multimedia que se envía entraña una transacción financiera. Ello abre multitud de posibles vías de lucro para "hurones" y creadores de virus. Los ordenadores no llevan incorporado un sistema de facturación, pero los teléfonos móviles sí. Los truhanes no tardarán en sacar provecho de esta circunstancia.

Existe ya un programa que lo hace. Se trata de un troyano, denominado RedBrowser, que envía un flujo continuo de mensajes de texto a un número de Rusia desde cualquiera de los teléfonos que infecta, hasta que el usuario apaga el teléfono. Cada mensaje tiene un coste de unos cuatro euros; las desdichadas víctimas se encuentran con facturas enormes. Algunas compañías de telefonía cargan a sus usuarios estas transacciones no autorizadas; en tales casos, los criminales, titulares del número fraudulento, obtienen pingües beneficios. Hasta la fecha, RedBrowser se ha detectado sólo en el interior de Rusia.

Mientras tanto, en EE.UU., los proveedores de servicios están introduciendo en los teléfonos la función de "monedero móvil." Los clientes podrán utilizar el teléfono para transferir fondos desde sus cuentas a otras entidades, mediante el envío de un mensaje de texto con un formato especial. PayPal, una empresa especializada en pagos por vía electrónica, ofrece un servicio parecido mediante el cual los usuarios adquieren bienes desde su teléfono. Tales servicios podrían atraer el interés de los autores de programas delictivos.

En vista de que el refinamiento de los programas telefónicos perversos y las posibilidades técnicas y financieras de los teléfonos móviles van en aumento, será preciso actuar con prontitud. Si se adoptasen ahora mismo las medidas apropiadas, se decapitarían los programas informáticos telefónicos malignos mientras aún se encuentran en la infancia y las aplicaciones para móviles son todavía de diseño flexible. Una oportunidad que no durará mucho tiempo.

Peligros sin fin

La razón de tantas prisas se comprende en cuanto se reflexiona sobre las muchas formas en que los hurones se valdrían —aunque no lo hayan hecho todavía— de los teléfonos inteligentes para provocar un desastre. En los ordenadores personales, algunos de los virus más dañinos se han difundido a través del correo electrónico o han forzado a las máquinas infectadas a vomitar correo basura en Internet. Ninguno de los programas perniciosos lanzados hasta ahora en las redes telefónicas saca provecho de la capacidad de estos equipos para enviar correos electrónicos. Pero la aparición de programas perversos que se propagan mediante mensajes infectados o convierten a los teléfonos en robots de difusión de mensajes basura es sólo cuestión de tiempo.

En el ámbito de los ordenadores personales, los programas-espía están proliferando como las setas en otoño; las posibilidades que abre la telefonía móvil para la invasión de la intimidad saltan a la vista. Hasta ahora se cuentan con los dedos de una mano los programas detectados que sacan partido de tal facilidad. Uno de ellos, el FlexiSpy, envía de forma periódica e invisible un registro de llamadas telefónicas y mensajes multimedia, enviados así como recibidos, a una tercera persona. El fisgón necesita conseguir acceso físico al teléfono de la víctima para descargar e instalar el programa de espionaje.

Sin embargo, es posible que los piratas informáticos (*hackers*) no tarden en incorporar fisgones de este tipo en virus capaces de replicarse por sí mismos. En los nuevos teléfonos, que graban conversaciones, los fabricantes habrán de tomar precauciones para impedir que tal capacidad convierta a sus usuarios en víctimas fáciles de programas malignos que registren las conversaciones y las retransmitan después a un fisgón.

Tenemos un hecho sorprendente: ni una sola de las más de 300 variedades de programas dañinos para móviles ha sacado partido de alguna deficiencia del soporte lógico (*software*) o de algún fallo en los sistemas de seguridad para colarse en un equipo vulnerable. Tal ha sido, en cambio, el *modus operandi* característico de numerosos virus y troyanos para ordenadores personales.

Los autores de programas malignos para telefonía se han basado exclusivamente en la "ingeniería social": tratan de hacer "picar" al usuario para que consienta la instalación en su teléfono del programa malicioso. Algunos se hacen pasar por programas de utilidad; otros se disfrazan de juego. El Cabir y el CommWarrior, en cambio, se propagan por medio de Bluetooth. Son muchos quienes aceptan los archivos, a pesar de que sus aparatos les advierten del riesgo y les dan la posibilidad de rechazar el programa foráneo.

Lo mismo el autor que otros investigadores les preguntaron a víctimas de tales virus por qué se avinieron a instalarlos. Una respuesta frecuente fue que en un principio no lo hicieron, que pulsaron en "No", pero la invitación volvía inmediata e insistentemente a presentarse en la pantalla. Como se ve, los gusanos no aceptan respuestas negativas; no le conceden al usuario ni un instante para pulsar la opción "Menú" y desactivar el Bluetooth. Y la mayoría de los teléfonos inteligentes, incluso en sus versiones más modernas, consienten este tipo de acosos en Bluetooth, que le niegan al usuario el control del teléfono mientras no acepte la transferencia del fichero (o hasta que se salga del alcance del dispositivo infectado que le está enviando la petición; pero son pocos quienes se percatan de esa posibilidad).

ANTIVIRUS PARA TELEFONOS MOVILES

COMPAÑIA	NOMBRE DEL PROGRAMA	SISTEMA OPERATIVO
F-Secure	Mobile Anti-Virus Mobile Security	PocketPC, Symbian, Windows Mobile Nokia Communicators
McAfee	VirusScan Mobile	PocketPC, Symbian, Windows Mobile
Symantec	AntiVirus for Handhelds Mobile Security	Palm, PocketPC, Windows Mobile Symbian
Trend Micro	Mobile Security	PocketPC, Symbian, Windows Mobile

Bestiario de programas malignos para telefonía móvil

NOMBRE	TIPO Y METODO DE INFECCION	EFECTOS
Cabir (descubierto en junio de 2004)	Gusano. Se conecta a otros equipos con Bluetooth y hace copias de sí mismo.	La búsqueda incesante de dispositivos Bluetooth descarga la batería del teléfono.
CommWarrior (descubierto en marzo de 2005)	Gusano. Se reproduce a través de Bluetooth; se envía a sí mismo en forma de mensaje multimedia (MMS) dirigido a los números de la libreta de direcciones del teléfono y en respuestas automáticas a los mensajes de texto (SMS) que llegan al teléfono. Se copia en la tarjeta extraíble de memoria y se inserta en otros archivos de instalación de programas en el teléfono.	Algunos usuarios sufren un cargo por cada archivo MMS que envía el gusano. Otras variantes inutilizan al teléfono por completo.
Doomboot (descubierto en julio de 2005)	Caballo de Troya. Se hace pasar por una versión del videojuego Doom 2, lo que tienta a los usuarios a descargar e instalar el programa.	Impide que el teléfono arranque e instala Cabir y CommWarrior.
RedBrowser (descubierto en febrero de 2006)	Caballo de Troya. Una página dolosa en una sede de la Red, que ofrece programas para descargar, tienta a los usuarios a instalar este programa en Java, que funciona en cientos de modelos de teléfono.	Envía subrepticiamente un flujo de mensajes de texto, al precio de 5 euros cada uno, a un número de teléfono en Rusia.
FlexiSpy (descubierto en marzo de 2006)	Espía. Se descarga de Internet; normalmente es instalado por alguien distinto del titular del teléfono.	Envía un registro de llamadas telefónicas y copias de mensajes de texto y MMS a un servidor comercial en Internet par ser visto por una tercera persona.

Un paso por delante

La única esperanza de pararles los pies a los programas dañinos para móviles, antes de que se degrade seriamente la utilidad y el valor de los teléfonos inteligentes, reside en una actuación rápida y coordinada por parte de todos los afectados. Existen ya programas antivíricos comerciales que inmunizan y desinfectan los teléfonos inteligentes. No obstante, son pocos los usuarios que han instalado tal protección. La situación ha de cambiar.

Los teléfonos han de incorporar cortafuegos que adviertan al usuario en el caso de que un programa tome el control para abrir una conexión a Internet. La protección de esta clase reviste especial interés para los aparatos que se conectan a redes Wi-Fi (cuyo nombre técnico es IEEE 802.11) para acceder directamente a la Internet pública. Numerosas compañías de telefonía móvil filtran el tráfico en las redes de datos GPRS o UMTS que sus dispositivos móviles utilizan, pero las redes Wi-Fi abiertas carecen de tal protección. Y aunque algunos transportistas filtran sus flujos MMS para eliminar los mensajes que contengan adjuntos malignos, no todos lo hacen todavía.

Algunos de los principales fabricantes de teléfonos han ingresado en Trusted Computing Group. Esta organización ha elaborado las normas que debería utilizar la industria en los microcircuitos de los teléfonos, con el fin de dificultar a los programas de intención maligna el acceso a datos delicados de la memoria del aparato o la invasión de sus sistemas de facturación. En fecha reciente, Symbian ha lanzado una nueva versión de su sistema operativo que ofrece mayor protección a los archivos de claves y exige de los autores de programas informáticos la obtención de certificados digitales emitidos por dicha compañía. El nuevo sistema Symbian se niega a instalar programas que no vengan provistos de un certificado. A menos que el usuario lo desactive, el sistema excluye a todos los programas malignos para móviles que se han descubierto hasta la fecha.

También los gobiernos podrían desempeñar un papel más constructivo. Pese a que la mayoría de los países cuenta con legislación contra hurones —de ordenadores normales y de computadoras alojadas en los teléfonos móviles—, la aplicación de tales leyes es laxa o inexistente en casi todo el mundo. Muchos de los países más duramente atacados por brotes de virus telefónicos, como Malasia, Indonesia o Filipinas, no siempre recogen estadísticas fiables y oportunas que resultarían de provecho para la detección y rastreo de delitos informáticos.

Mi equipo y otros grupos de la comunidad de investigación en seguridad han venido estudiando los sistemas Symbian y PocketPC, en busca de puntos vulnerables de su código o del diseño del sistema que pudieran consentir el acceso de programas dañinos. Tenemos la esperanza de hallar tales flaquezas, para repararlas antes de que el bando contrario se aproveche de ellas en la inevitable y próxima ronda de una batalla interminable.

El autor

Mikko Hyponnen es director de investigación en F-Secure, una compañía de seguridad informática de Helsinki que asesora a fabricantes de teléfonos móviles y a operadoras de redes telefónicas. Su equipo ha sido el primero en identificar y combatir docenas de virus: entre ellos, el infame gusano LoveLetter del año 2000. Hyponnen ha colaborado en investigaciones realizadas por Microsoft, la Oficina Federal de Investigación (FBI) y el Servicio Secreto estadounidenses; también con el Scotland Yard del Reino Unido.

Bibliografía complementaria

MOBILE PHONES AS COMPUTING DEVICES: THE VIRUSES ARE COMING! David Dagon, Tom Martin y Thad Starner en *IEEE Pervasive Computing*, vol. 3, n.º 4, págs. 11-15; octubre-diciembre 2004.

MOBILE PHONES; THE NEXT FRONTIER FOR HACKERS? Neal Leavitt en *Computer*, vol. 38, n.º 4, págs. 20-23; abril 2005.

¿Cómo podemos restaurar los mares costeros devastados por el crecimiento incontrolable de algas y plantas que provoca la actividad humana?



Recuperación de zonas muertas

LAURENCE MEE

Imagine el lector una playa atestada de veraneantes que gozan del cálido sol estival. Mientras los niños chapotean allí donde el agua no cubre, animales agonizantes y muertos llegan a la orilla. Primero, unos cuantos peces que se mueven con dificultad; después, masas malolientes de cangrejos, almejas, mejillones y peces putrefactos. Ante los gritos de los niños, los padres, angustiados, se precipitan al agua para llevárselos lejos. Mientras tanto, en el horizonte, pescadores frustrados vuelven a puerto en sus barcas con las redes y las bodegas vacías.

Esta escena no pertenece a un filme de horror de serie B. Incidentes de este tipo tuvieron lugar de forma periódica en numerosas localidades costeras del mar Negro en Rumania y Ucrania en los años setenta y ochenta del siglo pasado. Durante ese intervalo, se estima que perecieron 60 millones de toneladas de organismos bentónicos (los que medran sobre el fondo marino) por hipoxia (déficit de oxígeno), en una extensión de mar tan desprovista de oxígeno que no podía ya sustentar vida más allá de la bacteriana.

En su grado máximo, en 1990, la "zona muerta", situada en la parte noroccidental del mar, frente a la desembocadura del Danubio, se extendía por un área de las dimensiones de Suiza (40.000 kilómetros cuadrados). En el otro lado del planeta, en el golfo de México, frente al delta del río Mississippi, otra enorme zona muerta apareció a mediados del decenio de los setenta; en su extensión máxima alcanzó 21.000 kilómetros cuadrados. Varias áreas agonizantes o agotadas han ido apareciendo, en los últimos veinte años, en mares costeros y estuarios de todo el globo.

Determinar las causas de tamaña destrucción, los modos posibles de evitarla y las medidas idóneas para devolver la vida a las áreas afectadas han sido los objetivos principales de mi investigación desde los primeros años noventa, cuando publiqué mi primer artículo sobre la crisis ecológica del mar Negro. Los estudios de nuestro grupo y otros han revelado aspectos de interés sobre los acontecimientos que degradan los ecosistemas costeros en buena parte del mundo. Una información que ayudará a establecer pautas para la recuperación.

Formación de zonas muertas

Los oceanógrafos relacionan la creación de una zona muerta con la eutrofización: el sobreenriquecimiento del mar con nutrientes que promueven el crecimiento vegetal (sobre todo compuestos que contienen nitrógeno y fósforo). Estos "abonos" resultan esenciales para la salud del fitoplancton (algas y otros organismos fotosintéticos flotantes, que constituyen la base de la mayoría de las cadenas tróficas marinas), así como para el bienestar de las fanerógamas marinas y las algas que medran sobre el fondo de los mares someros y bien iluminados. Pero un exceso de estos nutrientes en aguas iluminadas acelera el crecimiento vegetal, lo que conduce a floraciones algales destructoras y a otros efectos indeseables.

Las plantas entran en la cadena trófica cuando sirven de pasto para animales marinos minúsculos (zooplancton), peces herbívoros y animales bentónicos filtradores (mejillones, ostras, etcétera). También, cuando esos consumidores mueren, se pudren, caen al fondo, son descompuestos por bacterias y se integran en los sedimentos subyacentes. La materia orgánica del fondo sirve, a su vez, de alimento a animales que viven allí: gusanos, camarones y algunos peces, entre otros.

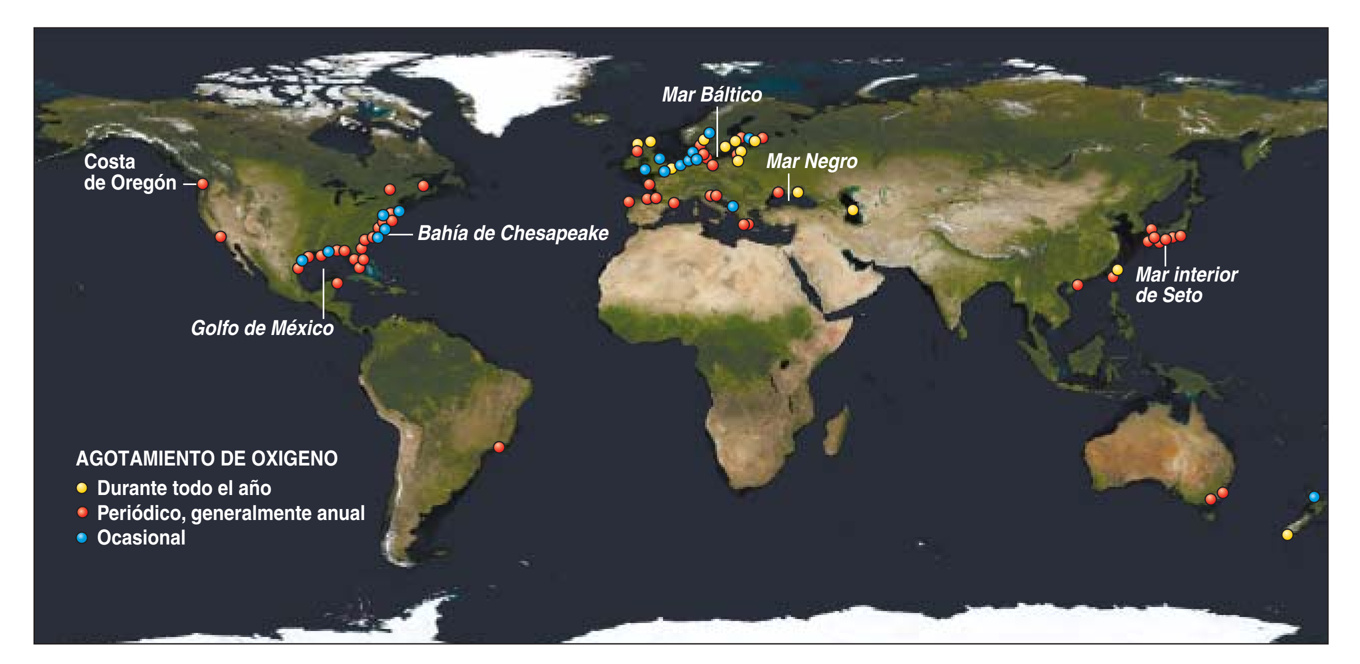
El tamaño de la población de fitoplancton está limitado por la disponibilidad de luz y nutrientes y por el pastoreo. Un aumento en la concentración de nitrógeno y fósforo insta la multiplicación explosiva de esos microorganismos fotosintéticos. Conforme la población de fitoplancton florece, el agua se torna verde o incluso parda. La sombra producida por el manto del fitoplancton impide el paso de la luz solar, imprescindible para las plantas subyacentes. Las fanerógamas marinas de bahías someras se ven asimismo recubiertas por microalgas (epífitos), que acaban por asfixiar a sus soportes hasta provocar su muerte. Además, las algas recubren los arrecifes de coral, sobre todo allí donde ha menguado la población de herbívoros residentes por culpa de la sobrepesca.

Un repunte notable en la población de fitoplancton y de epífitos acarrea dificultades a los organismos marinos del entorno, situación que empeora si se reducen los niveles de oxígeno en el fondo. La concentración de oxígeno cae cuando las bacterias consumen este gas para descomponer la materia orgánica resultante de los desechos animales y de los cuerpos muertos de los organismos que se multiplican durante la eutrofización. Gran parte de este material se acumula en el fondo del mar, donde suele escasear el oxígeno.



1. LA ZONA MUERTA DEL MAR NEGRO se hizo evidente cuando empezaron a acumularse organismos marinos moribundos en la costa, cerca de la desembocadura del río Danubio. Eran los años setenta. Arriba, peces muertos arrastrados a una playa del mar Muerto por la marea alta. Una fotografía de satélite del mar Negro occidental tomada en 2000 (*izquierda*) muestra las enormes floraciones de plantas microscópicas flotantes que resultaron de la descarga de aguas fluviales ricas en nutrientes.

THE VISIBLE EARTH/NASA (*imagen satélite*); RADU MIHNEA (*peces muertos*)



2. LAS ZONAS MUERTAS son áreas hipóxicas, debido a la descomposición bacteriana de poblaciones vegetales superabundantes y, por ello, carentes de la mayoría de los animales. Se encuentran en los mares costeros, a menudo cerca de países desarrollados. El número de regiones afectadas se ha duplicado desde 1990. Las aguas de escorrentía contaminadas procedentes de tierra suelen provocar la aparición de zonas muertas, aunque algunas tienen un origen natural. La zona muerta del mar Negro noroccidental es en la actualidad mucho menor de lo que fue, en su extensión máxima, decenios atrás.

THE VISIBLE EARTH/NASA (*imagen satélite*); FUENTE: BASADO EN *UNEP GEO YEARBOOK 2003*

El oxígeno entra en el agua a través de la fotosíntesis o mediante la difusión desde el aire en la superficie del mar. Si un área cuyo fondo está cubierto por plantas muertas presenta un fuerte gradiente de densidad que impide la mezcla con la suprayacente columna de agua, se agota en seguida el oxígeno del fondo, con la muerte consiguiente de comunidades animales enteras. (Dichos gradientes surgen de diferencias de temperatura o salinidad en el agua de distintas profundidades.) La secuencia básica esquematizada —eutrofización que conduce a floraciones de fitoplancton, actividad bacteriana excesiva en el fondo, depleción de oxígeno y muerte de plantas y animales— ha tenido lugar en cuantas zonas muertas se han examinado, sin excepción reseñable.

Aunque sí varían los pormenores, en función de las condiciones biológicas y físicas locales y en función de la tasa de entrada de nutrientes procedentes de tierra. Sirvan de muestra los estuarios en los que el agua se renueva poco: resultan particularmente vulnerables a los efectos de la eutrofización, porque un flujo de agua reducido entraña un reabastecimiento lento de oxígeno en las aguas del fondo. Esta depleción del oxígeno ha constituido un problema persistente a lo largo de la costa oriental de los EE.UU., donde se han visto afectados grandes estuarios, la bahía de Chesapeake incluida.

El exceso de nitrógeno y fósforo que entra en los mares costeros proviene, en buena medida, del cambio operado en los hábitos de la gente que vive en las áreas que drenan al mar. El consumo creciente de combustibles fósiles (que liberan nitrógeno a la atmósfera), los efluentes procedentes de granjas y la agricultura intensiva, así como la construcción de sistemas de alcantarillado que desaguan en masas de agua, considerado todo ello en su conjunto provoca una emisión mayor de nutrientes que terminan en las cuencas hidrográficas. El informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio que las Naciones Unidas hicieron público en 2005 indicaba que las entradas de compuestos nitrogenados en el mar aumentaron en un 80 por ciento entre 1860 y 1990. Según el estudio, las entradas totales procedentes de actividades humanas aumentarán en un 65 por ciento adicional para mediados del siglo que hemos iniciado. Es probable, pues, que las zonas muertas se extiendan todavía más, si no se emprenden acciones inmediatas para reducir la escorrentía de nutrientes.

Resumen/Mares costeros amenazados

- Los nutrientes procedentes de tierra que los ríos aportan a los mares costeros someros están destruyendo la vida en algunas áreas, que se convierten en zonas muertas.
- Los abonos favorecen el crecimiento explosivo del fitoplancton, que medra en superficie. Ese tapiz desmesurado priva de luz a las plantas infrayacentes y provoca el aumento de la cantidad de materia orgánica muerta que cae al fondo marino. Las bacterias que degradan los organismos muertos consumen el oxígeno del lecho, lo que ocasiona una auténtica mortandad entre la fauna bentónica.
- Mediante la reducción de la escorrentía procedente de la agricultura y de las aguas servidas, así como el control de la sobrepesca, se restablecerían estos ecosistemas marinos de importancia clave.

Tumba acuática

Aunque la aparición de una zona muerta corresponde a la fase final del proceso de eutrofización, los sistemas marinos, sobre todo las poblaciones animales, experimentan cambios mucho antes. A menudo, una cadena trófica marina costera saludable se inicia con diatomeas, algas fitoplanctónicas de cubierta silícea. Las consumen los copépodos. De estos crustáceos diminutos del zooplancton se alimentan, a su vez, los peces.

Las concentraciones crecientes de nutrientes repercuten en la mezcla de especies del fitoplancton, en el sentido de que las diatomeas suelen verse superadas en número por células fitoplanctónicas de menor tamaño o menos digeribles. Cuando la eutrofización produce floraciones masivas de fitoplancton, los copépodos se muestran incapaces de pastar las nuevas y abundantes especies de fitoplancton, así como la notable cantidad de detritus orgánicos resultantes de la disgregación del ecosistema. Una transformación que favorece el crecimiento de organismos gelatinosos muy tolerantes; tal *Noctiluca*, responsable de la fosforescencia nocturna que se produce al perturbar la superficie del agua. A esos organismos de tipo medusa se les denomina "especies de callejón sin salida"; por una razón obvia: los depredadores de niveles superiores tienen dificultades en alimentarse de ellos. Su presencia reduce el rendimiento de la cadena trófica, lo que conlleva la decadencia de las poblaciones de peces.

La sobrepesca agudiza ese desequilibrio trófico, sobre todo allí donde la actividad antrópica se dirige a "depredadores culminales" de gran valor: bacalao, merluza, dorada o anchova. La pérdida de especies superiores conduce a un aumento del número de especies presa pequeñas, lo que comporta una mengua del zooplancton (el alimento de los peces pequeños) y, en consecuencia, un aumento del fitoplancton. A esa secuencia se la conoce por "cascada trófica". Una cadena trófica ineficaz engendra más materia orgánica en el fondo marino, lo que eleva el riesgo de que éste acabe convertido en zona muerta.

Los ecosistemas alterados por la eutrofización se tornan más vulnerables a la invasión por especies exóticas. Pueden llegar a través de las aguas de lastre de buques transoceánicos. En el decenio de los ochenta, el ctenóforo *Mneniopsis leidyi*, probablemente originario de la costa oriental de los EE.UU., se instaló en el mar Negro. En 1990, este voraz depredador de "callejón sin salida" dominaba el ecosistema; en su máximo alcanzó la asombrosa densidad de hasta cinco kilogramos por metro cuadrado.

Los bancos de marisco pueden evitar la degradación de un ecosistema. En numerosos estuarios de la costa oriental estadounidense, las ostras actúan como ingenieros ecosistémicos mediante la formación de poderosos arrecifes que se elevan varios metros del fondo marino; dichos arrecifes soportan organismos de tipo muy diverso, entre ellos lenguados, pargos, mojarras y cangrejos azules.

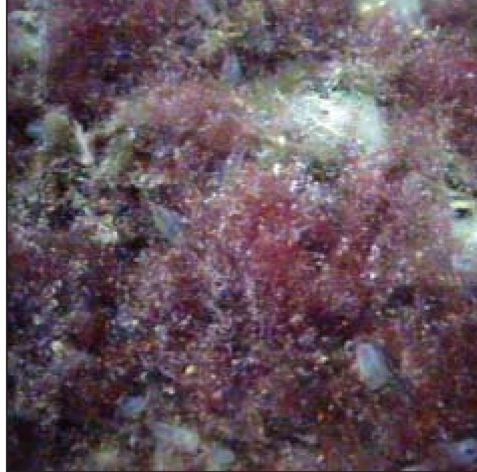
Hunter Lenihan, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Charles H. Peterson, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, han demostrado que la parte superior de los arrecifes de ostras en el río Neuse, de Carolina del Norte, se convirtió en refugio para las especies bentónicas desplazadas, en el inicio de la formación de la zona muerta, porque se elevaban por encima de la capa de agua hipóxica. Sin embargo, la recolección mecánica de ostras reduce la altura de los arrecifes, lo que contribuye a la destrucción de la resiliencia (tenacidad) natural de estos ecosistemas.

La catástrofe del mar Negro

El mar Negro ofrece un ejemplo espectacular de ecosistema marino destruido por un exceso de nutrientes. Pero proporciona también claves para su regeneración. Las aguas del área noroccidental sufrieron la eutrofización cuando las entradas de compuestos nitrogenados y fosforados, procedentes de tierra, se duplicaron entre los decenios de los sesenta y los ochenta. Se transportaron a través del Danubio, que drena buena parte de las cuencas hidrográficas de once países de Europa central, desde Alemania hasta Rumania. Semejante carga procedía de la escorrentía agrícola, las aguas negras urbanas e industriales y, en el caso de los compuestos nitrogenados, el transporte atmosférico. La mitad, por lo menos, del incremento del nitrógeno que llegaba al mar Negro derivaba de las prácticas agrícolas modernas: uso intensivo de fertilizantes y construcción de granjas enormes. El aumento de los efluentes de fósforo se debía sobre todo al vertido de aguas negras industriales y urbanas, cargadas de detergentes polifosfatados; las actividades agrícolas contribuían en menor grado.

Antes del decenio de los sesenta, la región noroccidental del mar Negro, somera, correspondía a un sistema diverso y productivo; incluía





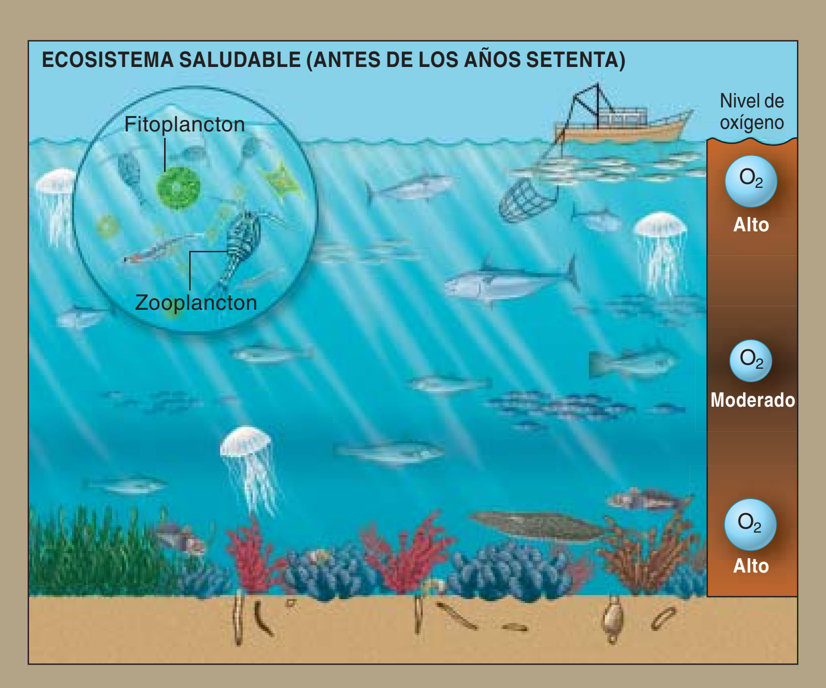
3. COMUNIDADES BENTONICAS MUERTAS Y RECUPERADAS se observan en estas fotografías de dos lugares del mar Negro a primeros de 2006. A la izquierda, un área empobrecida cubierta por las conchas de mejillones muertos por falta de oxígeno disuelto. A la derecha, una localidad recuperada, con un recubrimiento denso y variado de algas, junto con un número elevado de ascidias (tunicados).

TIM STEVENS

FORMACION DE UNA ZONA MUERTA

Los acontecimientos que propiciaron la creación de la zona muerta del mar Negro guardan semejanza con los que forman áreas similares pobres en oxígeno (hipóxicas), aunque los detalles varían de un caso a otro. En el origen está la eutrofización, una entrada excesiva de nutrientes que provoca un crecimiento desmesurado de algas y otras plantas microscópicas flotantes y fotosintéticas; ello lleva indirectamente a la hipoxia y, por fin, a la muerte de animales y plantas bentónicos.

La degradación del ecosistema siguió tres fases, según la descripción de Tatsuki Nagai, de la Agencia de Investigaciones Pesqueras del Japón, quien estudió una de las primeras regiones hipóxicas conocidas. Dichas condiciones hicieron su aparición en el mar interior de Seto a principios del decenio de los sesenta. Nagai denominó al estado natural "mar de pargo rojo" (especie depredadora muy apreciada por los pescadores locales). Después, cuando las poblaciones de especies depredadoras se redujeron y dejaron tras sí especies de peces presa pequeños, sobre todo, vino el "mar de boquerones". Por fin, llegó el "mar de medusas", en el que la mayoría de otras especies habrían muerto o huido, quedando como dominantes especies invasoras muy tolerantes. Nagai descubrió también que la sobrepesca contribuía a la degradación de la cadena trófica marina (mediante la eliminación de los peces depredadores superiores).



En el mar Negro noroccidental las aguas cercanas a la superficie contenían inicialmente una mezcla amplia de fitoplancton (algas y otras plantas microscópicas flotantes), peces de distintas especies y otros organismos. En las aguas someras cercanas a la costa había cardúmenes de boquerón, caballa y bonito inmaduros. En las profundidades intermedias medraban bancos de depredadores superiores, tales como bacaladilla, y numerosos peces presa, amén de algunas medusas. En el fondo, comunidades de mejillones, así como gobios, rodaballo, esturión y cangrejos ermitaños habitaban entre los extensos prados de fanerógamas marinas y de algas pardas y rojas.

extensos tapices costeros de algas pardas bentónicas y, aguas adentro, la mayor comunidad de algas rojas de la Tierra (un campo de *Phyllophora* del tamaño de Holanda). Estos prados naturales de algas coexistían con enormes bancos de mejillones y otros bivalvos. En su conjunto, el sistema soportaba un gran número de especies de invertebrados y peces.

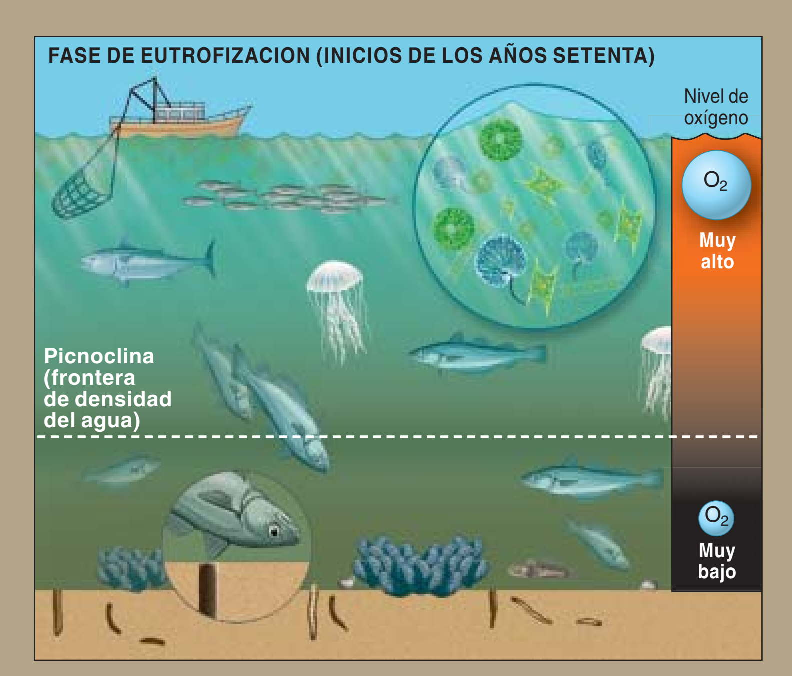
Las algas contribuían a la oxigenación de las aguas del fondo y los mejillones filtraban el agua de mar, con lo que se mantenían unas buenas condiciones lumínicas para la fotosíntesis. Este ecosistema era muy resiliente, capaz de resistir amplias variaciones climáticas y perturbaciones naturales. Sin embargo, a medida que los efluentes de nutrientes aumentaban, en las aguas superficiales aparecieron densas floraciones de fitoplancton. Este crecimiento exuberante redujo la transparencia del agua, privando de luz a las algas bentónicas; ello condujo por fin a su pérdida, con la consiguiente perturbación general del ecosistema.

Durante los meses de verano, cuando la columna de agua se estratificaba, los niveles de oxígeno, sobre todo cerca del fondo marino, empezaron a disminuir. Una fracción importante de las comunidades de bivalvos afectadas sobrevivió a la hipoxia durante un período de hasta 20 días: cerraron sus valvas y se alimentaron de las reservas internas de glucógeno (carbohidrato que constituye el principal almacén molecular de energía en un animal). Pero cuando estas reservas se agotaron, los moluscos murieron en masa. A continuación, bacterias y otros organismos consumieron el oxígeno local que quedaba conforme degradaban los animales muertos, con la liberación consiguiente de más nutrientes. Para cuando casi todo el oxígeno había desaparecido, la fauna que solía medrar en la zona había emigrado en busca de comida y oxígeno, o había muerto. El ecosistema natural de la región resultó gravemente dañado.

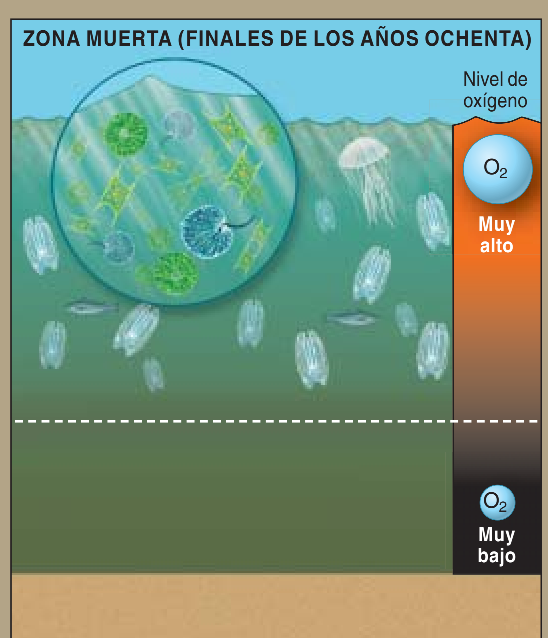
El área empezó a recuperarse a raíz de la caída de los regímenes comunistas de Europa oriental. Era a finales de 1989. El desplome terminó con la planificación económica centralizada. Los agricultores de la región se encontraron con que carecían de capacidad financiera para la compra de abonos. La actividad agrícola entró en un período de letargo. Y cerraron la mayoría de las gigantescas granjas. Ambos factores explicaron la drástica reducción de nutrientes en el agua de escorrentía. Una antigua granja porcina en Rumania, con más de un millón de cerdos, había generado las emisiones equivalentes a las de una ciudad con cinco millones de habitantes.

En seis años de menor entrada de nutrientes se logró una reducción de la zona muerta, si bien fue gradual la recuperación del fondo marino. La investigación acometida por expertos ucranianos ha demostrado que el restablecimiento de los bancos de mejillones de partes devastadas de la plataforma noroccidental no terminó de asentarse hasta 2002, muchos años después de que lo lograran otras co-

SHAWN GOULD



Con la entrada creciente de nitrógeno y fósforo procedentes de la escorrentía continental, la ecología de la región costera del mar Negro empezó a cambiar. El agua se tiñó de verde con proliferaciones masivas de fitoplancton, e incluso de marrón. Así, se privaba de luz solar a las plantas que vivían debajo; precipitábase hacia el fondo una lluvia continua de materia orgánica en descomposición. Después, las bacterias del fondo consumieron grandes cantidades de oxígeno mientras se deleitaban con la materia orgánica y las plantas muertas; ello produjo hipoxia en el fondo marino, lo que mató a numerosos organismos bentónicos.



La turbiedad e hipoxia crecientes en el lecho marino dejaron las aguas del fondo desprovistas de vida. La sobrepesca ya había reducido el número de especies de peces depredadores; éstos y otros animales de gran tamaño terminaron por desaparecer de la zona. Especies invasoras oportunistas, sobre todo el ctenóforo *Mnemiopsis leidyi*, se multiplicaron en las aguas superficiales.

munidades. En agosto de 2006, una expedición que dirigimos para examinar el estado del mar reveló una recuperación notable de las comunidades de algas bentónicas, aunque no se trataba, en general, de las mismas especies que habían dominado la zona antes de la aparición de las condiciones de zona muerta.

El largo camino hacia la recuperación

La regeneración de las zonas muertas exige la reducción de la entrada de nutrientes procedentes de las tierras inmediatas. Como mínimo. Pero los ecosistemas marinos que se han desplomado por culpa de la eutrofización y la hipoxia quizá no retornen tan fácilmente a la situación anterior, aunque el hombre recorte el vertido de nutrientes en los ríos. Tres razones explican esta resistencia a la recuperación.

En primer lugar, las cuencas hidrográficas poseen una enorme capacidad de almacenar nutrientes, disueltos en las aguas freáticas o adsorbidos en las partículas del suelo. Pueden pasar años, decenios incluso, antes de que los fertilizantes de nitrógeno y fósforo y otras sustancias dejen de filtrarse y llegar al mar. Los compuestos nitrogenados, en particular, tienden a acumularse en las aguas freáticas.

En segundo lugar, las zonas muertas persisten si en las cercanías escasean las poblaciones sanas de plantas y animales marinos que proporcionan las "semillas" a partir de las cuales puedan restablecerse las comunidades que desaparecieron. Cabe la posibilidad de una extinción de la flora y la fauna que antaño medraban en la zona afectada. Los animales marinos nativos pueden recorrer largas distancias en forma de larvas, desde ecosistemas sanos, y establecerse de nuevo en un nicho ecológico vacío adecuado. A veces, sin embargo, estas especies que potencialmente regresarían encuentran ocupado su vacío por organismos oportunistas invasores que se han adueñado de todos los hábitats disponibles.

El tercer factor guarda relación con ciertas alteraciones que la eutrofización causa en la composición del ecosistema. Alteraciones que no se invierten con facilidad. A medida que aumenta la concentración de nutrientes, disminuye la población de algunas especies; sin embargo, el ecosistema en su conjunto puede permanecer fuerte durante un período de tiempo largo, si las poblaciones naturales resisten el repunte fitoplanctónico.

Ahora bien, en algún momento se llega a un umbral en el que la pérdida de especies clave produce un desplome brusco, que resulta en un nuevo estado de degradación. Este nuevo equilibrio surge de la presencia de algunas especies que se han mostrado tolerantes a la eutrofización y de la llegada de especies oportunistas procedentes de otros lugares. Por desgracia, el nuevo estado alcanzado suele mantenerse muy estable. En consecuencia, reconducir la entrada de nutrientes hasta los niveles anteriores a la eutrofización quizá no baste para reinstaurar el ecosistema

original. Podría ser necesario reducir las concentraciones a niveles muy inferiores a los de partida.

Para complicar más aún las cosas, el umbral que hemos de traspasar para instar el cambio desde un estado natural a otro degradado se alcanza antes si la resiliencia del ecosistema ha quedado menguada por culpa de la sobrepesca. Cabe, pues, que la recuperación de la zona deprimida exija también una reducción notable de las actividades pesqueras. Con todo, si las especies originales se han perdido o han aparecido invasores, las condiciones anteriores, prístinas, quizá no se recuperen nunca.

Eliminar las zonas muertas

Para recuperar las zonas deprimidas no basta con saber qué es lo que hay que hacer. A los gobiernos incumbe considerarlo prioritario y tomar la iniciativa. La escasez de casos de recuperación de zonas muertas se debe a que la reducción de la escorrentía de nutrientes procedente de tierra requiere cambios importantes en las prácticas agrícolas y en la depuración de aguas contaminadas. Hasta ahora, la mayoría de estos programas han conseguido recortes sólo parciales en los flujos de nutrientes de origen terrestre.

Para limitar la carga de nutrientes han de acometerse planes generales —de toda una cuenca hidrográfica— que confinen el nitrógeno y el fósforo en tierra. Tales esfuerzos se han llevado a cabo en la bahía de Chesapeake y en el mar Negro. En este último caso, los gobiernos de los países ribereños, con ayuda del Servicio Ambiental Global de las Naciones Unidas, han acordado aplicar un proyecto encomiable: mantener las concentraciones de nutrientes en las aguas de escorrentía en los niveles de mediados del decenio de los noventa. Este plan está contribuyendo a la recuperación de zonas muertas mediante proyectos piloto para la mejora de las prácticas agrícolas y el tratamiento de residuos.

Con todo, la recuperación total y sostenible del mar Negro exige la resolución previa de dos problemas graves. Las autoridades europeas deben tomar medidas que aseguren que el desarrollo económico no conduzca a la reaparición de vertidos en el mar de nutrientes de origen terrestre; por ejemplo, mediante la inversión en proyectos de reducción de residuos que empleen técnicas avanzadas. Este punto reviste suma importancia para la cuenca del Danubio, en la que seis de sus países se han incorporado a la Unión Europea o están en proceso de adhesión. Algunos agricultores de Europa occidental, donde la agricultura intensiva ha eutrofizado ríos y aguas costeras, desean comprar tierras de cultivo en Europa central.

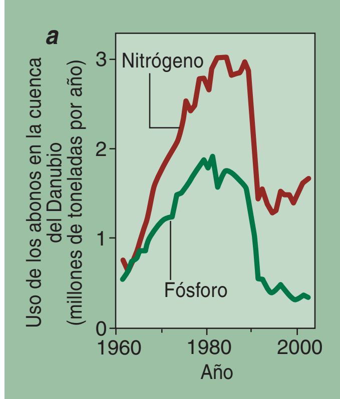
Los gobiernos deben también reducir la intensidad de la pesca comercial, para favorecer la recuperación de las poblaciones esquilmadas de peces depredadores. Además, las redes de arrastre y las rastras de los barcos pesqueros destruyen comunidades bentónicas clave, por lo que su regulación tendría que ser restrictiva.

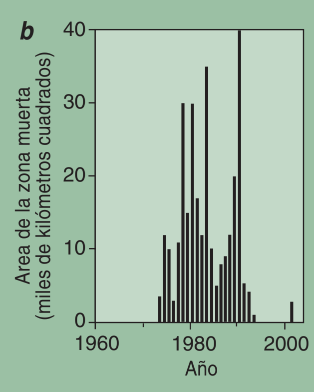
Las naciones marítimas de todo el mundo deben reducir la presión pesquera en las áreas eutróficas, tarea nada fácil en la actual situación de sobreexplotación que afecta a más de la mitad de las pesquerías del planeta. Aunque se ha firmado un acuerdo internacional para el establecimiento en 2012 de una red global de áreas marinas protegidas (lo que contribuiría a la reducción de la sobrepesca y

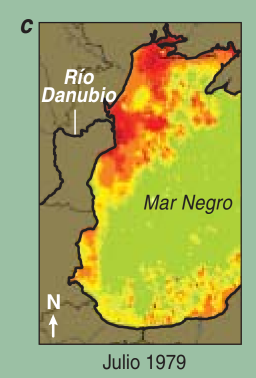
La regeneración del mar Negro

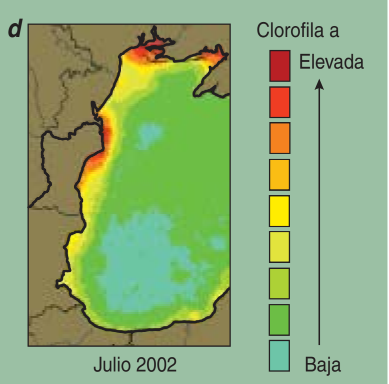
La recuperación de la zona muerta del mar Negro subraya la necesidad de reducir la escorrentía de nutrientes procedentes de la agricultura, de las aguas servidas y de otras fuentes terrestres, si es que se pretende recuperar las áreas afectadas. La zona muerta adyacente a la costa noroccidental del mar Negro empezó a revivir tras el hundimiento del sistema comunista en 1989, debido a la consiguiente reducción de la agricultura intensiva —cría de ganado a gran escala y aplicación de enormes cantidades de abonos nitrogenados y fosforados (*a*)— que había predominado desde los años sesenta. Los residuos de nutrientes se abrieron camino hasta el río Danubio y otras cuencas hidrográficas. Por fin, llegaron al mar Negro; ello provocó la aparición de la zona muerta en 1973 y su retorno en verano durante los 21 años siguientes (*b*). El color rojo en una imagen de 1979 de satélite (*c*) revela un área extensa de agua sobrefertilizada. (En esta imagen y en *d*, la eutrofización se estimó mediante la determinación de la concentración de clorofila a, un indicador del crecimiento vegetal, en las aguas superficiales.)

Pasados cinco años del final de la agricultura intensiva, se regeneró la región degradada (*b* y *d*), con una sola recaída durante el verano excepcionalmente cálido de 2001. En 2002, las comunidades de mejillones del área se habían restablecido. Sin embargo, el mar puede verse amenazado de nuevo, pues las economías de los países de Europa central se recuperan y en ellos se vuelve a una agricultura intensiva.

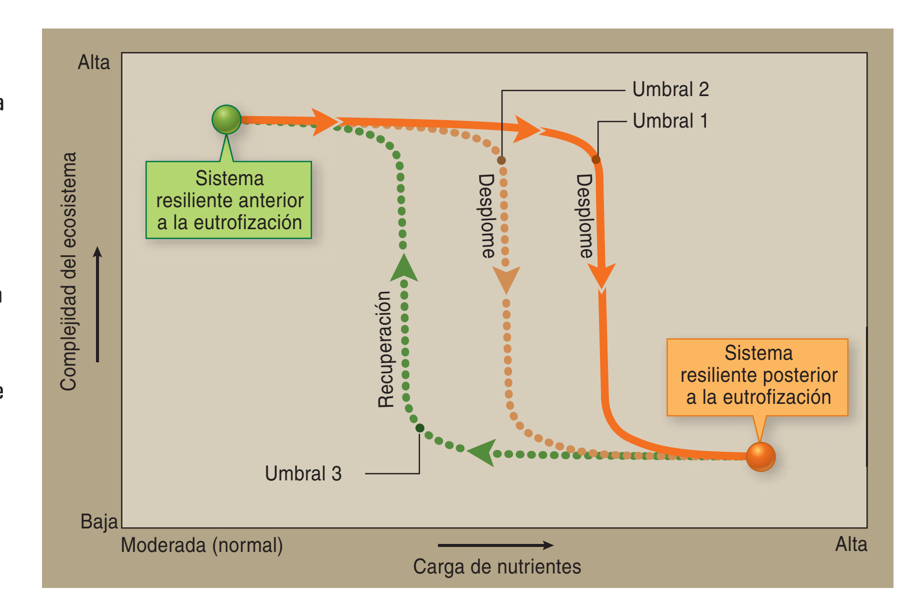








CZCS/SeaWiFS DATOS PROCESADOR POR ABIGAIL McQUATTERS-GOLLOP (*c* y *d*)



4. LA REDUCCION DEL NIVEL DE NUTRIENTES al que había antes de la formación de una zona muerta quizá no sea suficiente para asegurar la recuperación de la misma. Así se muestra en este gráfico, donde se pone en relación la salud de un ecosistema (en términos de complejidad o diversidad específica) con la cantidad de nutrientes a su disposición. Un sistema con diversidad elevada y entradas moderadas de nutrientes de origen terrestre tiende a ser resiliente (tenaz), hasta que la carga de nutrientes sobrepasa un nivel determinado (*umbral 1*), lo que hace que el sistema se desplome hasta un estado de complejidad menor. Este punto de inflexión se alcanza antes (*umbral 2*) si la sobrepesca reduce el número de peces depredadores superiores, con la merma consiguiente de diversidad específica. Lamentablemente, el nuevo estado degradado también muestra resistencia al cambio; quizá recupere la complejidad perdida sólo si las entradas de nutrientes se reducen de forma notable por debajo de los niveles iniciales (*umbral 3*). Pero si se han extinguido las especies clave, el ecosistema podría no retornar nunca a su estado originario.

JEN CHRISTIANSEN

a la conservación de las poblaciones reproductoras vitales, necesarias para la recuperación de las zonas muertas), es improbable que se alcancen los objetivos del acuerdo. Por una razón poderosa: no hay mecanismos que aseguren el cumplimiento de la normativa.

Habría que explicar a las autoridades que no basta con una recuperación parcial de un ecosistema que ha devenido eutrófico. Podría quedar en una situación muy inestable. Los mejillones, por ejemplo, tienen una capacidad extraordinaria para filtrar el agua; se ha empleado la instalación de bancos de mejillones en arrecifes artificiales para mejorar la calidad del agua. Pero la descomposición bacteriana de las heces de los mejillones y de los individuos muertos consume gran cantidad de oxígeno, lo que origina ciclos de prosperidad y declive en localidades en las que las aguas apenas se mezclan y la renovación de oxígeno es limitada. En estos casos, las comunidades florecientes de mejillones se desploman de repente, dejando una zona muerta hasta que la materia orgánica se ha descompuesto por completo y la recuperación empieza de nuevo. Este fenómeno se ha observado en estuarios del mar Báltico. El reto para los gestores de los recursos marinos se basa en la conservación de las condiciones que mantienen resilientes y diversificados los sistemas, incluso allí donde ya no es posible la recuperación total.

En un plano más sutil, la calificación de la salud o calidad de un ecosistema depende de los valores de los habitantes locales. Para unos, el resultado deseable de la reinstauración sería un mar lleno de peces pequeños; otros, en cambio, preferirán que la regeneración conlleve la abundancia de depredadores superiores.

Las zonas costeras muertas nos recuerdan que la humanidad no puede sentarse y esperar que los ecosistemas naturales absorban nuestros residuos sin sufrir consecuencias graves y a menudo inesperadas. Ahora sabemos cómo recuperar zonas deprimidas, pero los pasos necesarios para hacerlo dependen, en último término, de nuestro reconocimiento de las ramificaciones que para el ambiente tiene la eliminación de residuos y de nuestra valoración de los ecosistemas marinos.

El autor

Laurence Mee dirige el Instituto Marino y el Grupo interdisciplinario de Investigación en Política Marina y Costera, ambos en la Universidad de Plymouth. Se doctoró en la Universidad de Liverpool. Investiga sobre la protección del medio marino, las cuencas hidrográficas y áreas costeras asociadas.

Bibliografía complementaria

MARINE BENTHIC HYPOXIA: A REVIEW OF ITS ECOLOGICAL EFFECTS AND THE BEHAVIORAL RESPONSES OF BENTHIC MACROFAUNA. R. J. Diaz y R. Rosenberg en *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, vol. 33, págs. 245-303; 1995.

NATIONAL ESTUARINE EUTROPHICATION ASSESSMENT: EFFECTS OF NUTRIENT ENRICHMENT IN THE NATION'S ESTUARIES. S. B. Bricker, C. G. Clement, D. E. Pirhalla, S. P. Orlando y D. R. G. Farrow. NOAA, National Ocean Service, Special Projects Office and the National Centers for Coastal Ocean Science, 1999.

NUTRIENT-ENHANCED PRODUCTIVITY IN THE NORTHERN GULF OF MEXICO: PAST, PRESENT AND FUTURE. N. N. Rabelais, R. E. Turner, Q. Dortch, D. Justic, V. J. Bierman y W. J. Wiseman en *Hydrobiologia*, vol. 475, n.º 6, págs. 39-63; 2002.

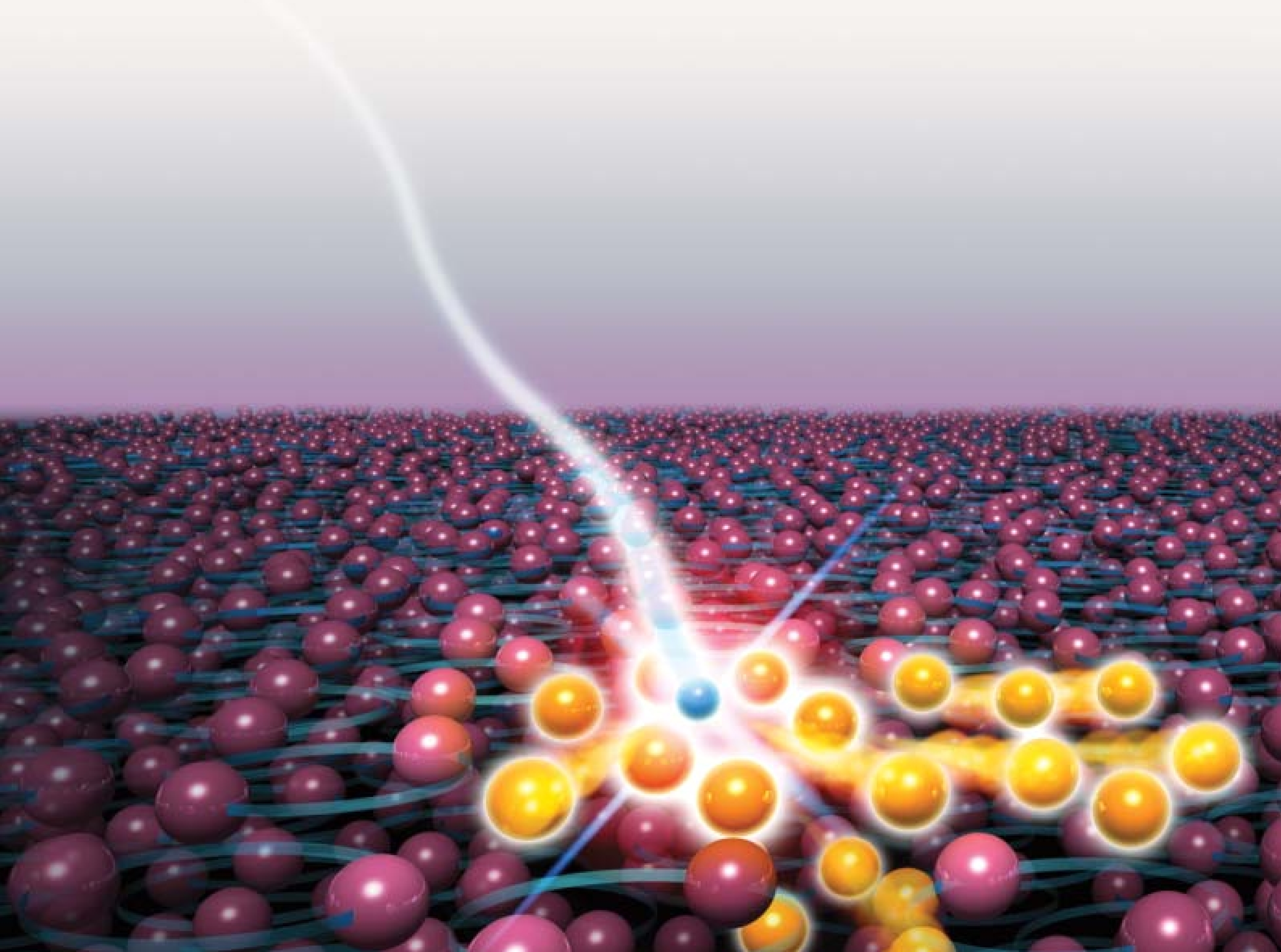
ECOSYSTEMS AND HUMAN WELL-BEING: CURRENT STATE AND TRENDS. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, 2005.

RESTORING THE BLACK SEA IN TIMES OF UNCERTAINTY. L. D. Mee, J. Friedrich y M. T. Gomoiu en *Oceanography*, vol. 18, págs. 32-43; 2005.

VER con superconductores

Con material superconductor se construyen minúsculos y magníficos sensores de fotones y otras partículas. Están revolucionando la investigación y la técnica

Kent D. Irwin



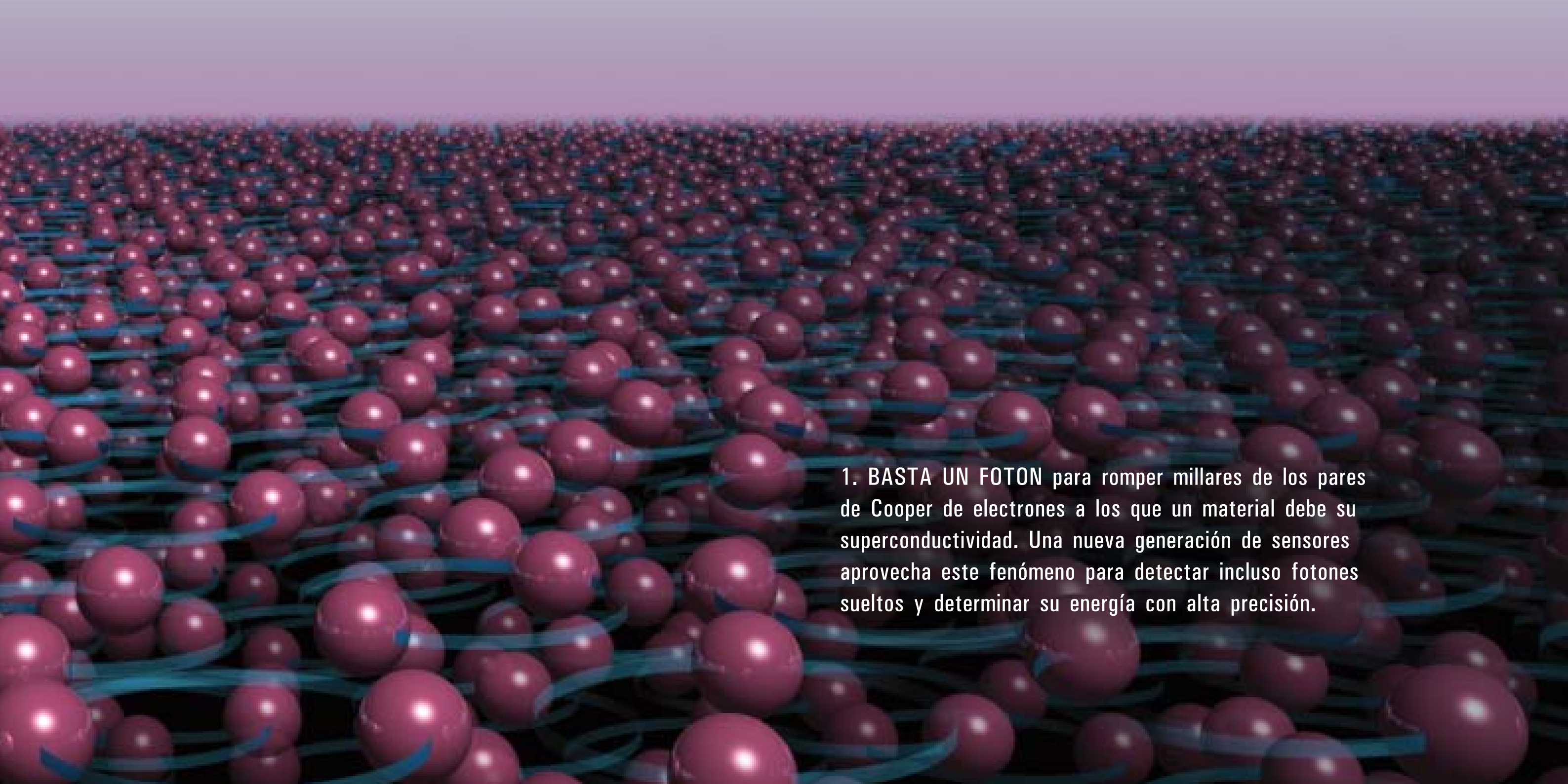
Los ojos, excelentes detectores de luz, determinan la intensidad, el color y la distribución espacial de los rayos que inciden en ellos. La retina humana tiene más "píxeles" que una cámara fotográfica digital corriente: cerca de seis millones de conos, células que distinguen el color, y más de 100 millones de bastoncillos, células de la visión en la oscuridad. La sensibilidad es altísima. Una célula de los bastoncillos adaptada a la oscuridad manda una señal al cerebro cuando absorbe una partícula de luz, o fotón, la unidad cuántica más pequeña de una onda electromagnética. Con seis de estas señales de un solo fotón, el cerebro percibe un destello. Pero los ojos y las cámaras fotográficas comerciales distan de ser ideales para muchas tareas, porque sólo detectan fotones cuyas frecuencias caen en el intervalo del visible. Aunque captan colores, no miden la frecuencia específica de cada fotón.

Los detectores científicos e industriales perciben fotones de los dominios electromagnéticos más allá de la luz visible: en las bajas frecuencias (longitud de onda larga, baja energía) del infrarrojo y las microondas y en las altas frecuencias de los rayos X y gamma. No es que dispongan de una capacidad ilimitada. En especial para las longitudes de onda visibles y más largas, se ha carecido de detectores que "vean" fotones sueltos y disciernan con precisión su frecuencia y, por tanto, su energía. La determinación de la frecuencia de los fotones proporciona abundante información acerca de la materia que los emitió.

Una revolución en la detección de fotones ha comenzado con el advenimiento de los sensores basados en la superconductividad. Miden con mucha mayor precisión a lo largo de todo el espectro electromagnético, de las ondas de radio a los rayos gamma, pasando por la luz visible. Pronto habrá dispositivos mejorados que establecerán el patrón que las ondas gravitacionales de la gran explosión imprimieron en la polarización de la radiación del fondo cósmico de microondas.

Los detectores que cuentan fotones visibles uno a uno están mejorando la seguridad de las comunicaciones cuánticas. En los sincrotrones se estudia la composición química de los materiales gracias a los detectores superconductores de rayos X. Se están desarrollando detectores de rayos gamma que distinguirán mejor unos materiales nucleares de otros, a fin de evitar que sean robados o se los introduzca de contrabando a través de las fronteras internacionales.

Los dispositivos superconductores no sólo detectan fotones. Analizan también polímeros biológicos y buscan las "partículas masivas que interaccionan débilmente" que, se cree, constituyen la materia oscura; a ésta corresponden cinco de cada seis partes de la materia del universo. Los detectores superconductores apenas están empezando a dar de sí lo que cabe esperar de ellos científica e industrialmente.



SLIM FILMS

1. BASTA UN FOTON para romper millares de los pares de Cooper de electrones a los que un material debe su superconductividad. Una nueva generación de sensores aprovecha este fenómeno para detectar incluso fotones sueltos y determinar su energía con alta precisión.

Util fragilidad

Una característica de los superconductores que restringe su uso —por ejemplo, para la transmisión de energía— les habilita, sin embargo, como detectores de fotones. La superconductividad, el flujo de corriente eléctrica sin resistencia, se presenta cuando los electrones de un material adecuado para ello se ligan dos a dos. "Pares de Cooper" se llama a esas parejas. Su conjunto constituye un superfluido. La superconductividad, un frágil fenómeno mecano-cuántico, se da en un material sólo cuando se enfría por debajo de una temperatura bajísima, la temperatura crítica de transición, diferente para cada material. El enfriamiento reduce las vibraciones de los átomos. Si la temperatura se eleva por encima de ese umbral, la energía térmica de las vibraciones disocia los pares de Cooper y elimina la superconductividad.

Ante tamaña sensibilidad al calor, muchos dispositivos superconductores tienen que enfriarse hasta apenas unos grados por encima del cero absoluto (0 kelvin, –273,15 grados centígrados). Algunos requieren temperaturas de centésimas de kelvin. Estas temperaturas extremas se alcanzan con refrigeradores comerciales que operan con helio líquido o mediante un proceso de desmagnetización adiabática. La necesidad de tal enfriamiento prohíbe muchas aplicaciones. Desde hace tiempo se viene intentando crear materiales con una superconductividad más robusta, que persista a temperaturas superiores.

La misma fragilidad de la superconductividad es, sin embargo, la razón de que resulte ideal para detectores sensibles. Los detectores de fotones superconductores se basan en la capacidad de la energía de un solo fotón para destruir millares de pares de Cooper. El cambio en el estado superconductor se puede medir entonces de diversas maneras, que revelarán la energía depositada por el fotón. Conocer la energía de un fotón es conocer su frecuencia, proporcional a aquélla. Y la frecuencia es la clave para saber más acerca del objeto del que proviene el fotón.

Los detectores de semiconductores de temperatura ambiente, como los dispositivos acoplados a la carga (CCD) de las cámaras fotográficas digitales, se apoyan también en la perturbación de un estado cuántico en un material. En un CCD, un fotón de luz visible arranca un electrón de una banda de energía en un cristal semiconductor. Pero los electrones se encuentran en esas bandas tan fuertemente ligados, que, por lo general, sólo se libera un electrón por cada fotón. Esa liberación no basta para revelar la frecuencia del fotón. Consecuentemente, un CCD no puede medir el color de un fotón de manera directa; las cámaras fotográficas digitales producen imágenes en color gracias a un sistema de filtros rojos, verdes y azules que dejan pasar los fotones por gamas de frecuencias.

En cambio, un fotón visible puede romper en un superconductor millares de pares de Cooper. La creación de miles de excitaciones permite una medición precisa de la energía, de la misma manera que una encuesta electoral es más exacta cuando se entrevista a millares de personas.

Hay dos tipos principales de detectores que se fundamentan en la interrupción de la superconductividad: térmico y de rotura de pares. El tipo térmico se enfría justo hasta la temperatura de transición, donde sólo en parte se encuentra en estado superconductor y las excitaciones térmicas están a punto de destruir la superconductividad enteramente. Cualquier energía depositada en el superconductor aumenta su temperatura y hace que su resistencia eléctrica suba de manera perceptible. El tipo de detector de rotura de pares, en cambio, se enfría por debajo de la temperatura de transición y se halla en estado superconductor. Mide el número de pares de Cooper que se rompen cuando se deposita energía en el superconductor.

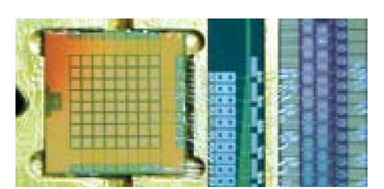
Para ser exhaustivos debe mencionarse otra variedad de dispositivos superconductores: el "mezclador" superconductor, que amplifica las señales electromagnéticas de más baja frecuencia, como las microondas. Como no se basa en la fragilidad de la superconductividad, cae fuera del alcance de este artículo.

Los detectores térmicos se fundan en la resistencia eléctrica de un superconductor, que aumenta bruscamente de cero a su valor normal en el muy estrecho intervalo de temperaturas en que el material pasa del estado superconductor al normal. Ese cambio drástico de la resistencia permite que el superconductor actúe como un termómetro ultrasensible. A los detectores que utilizan así la transición de fase superconductora se les denomina "sensores de borde de transición" (SBT). Cuando un SBT absorbe un fotón, la energía de éste se convierte en calor, que aumenta la temperatura del material y, por tanto, la resistencia, proporcionalmente a la energía depositada. En razón del material que absorba el fotón, un SBT puede servir de espectrómetro para medir la energía de los rayos X y los rayos gamma, puede operar como contador de fotones en el infrarrojo cercano a las longitudes de onda visibles o puede funcionar

Resumen/Detectores superconductores

- Unos sensores que lo mismo detectan partículas de luz (fotones) sueltas y determinan su energía que miden con precisión una señal compuesta por muchos fotones resultan por fuerza apropiados para innumerables aplicaciones científicas y técnicas: rastrean materiales con los que podría construirse un arma nuclear, buscan defectos en los microchips y sirven para la astronomía, el análisis químico y la física de partículas.
- Una nueva y revolucionaria generación de tales sensores saca partido de las características de los superconductores para medir la energía de los fotones con mucha mayor precisión. Además, gracias a una respuesta más rápida, aceleran la toma de datos.
- Los nuevos detectores se dividen en dos clases. Los sensores térmicos aprecian cómo la energía de un fotón aumenta la temperatura del material del detector. Los detectores de rotura de pares captan la rotura por el fotón de algunos de los emparejamientos de electrones que causan la superconductividad.

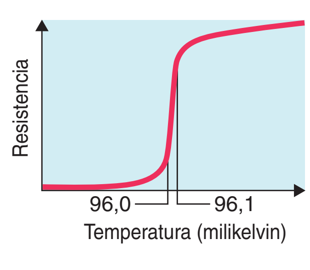
DETECCION DE LA LUZ POR UN SUPERCONDUCTOR

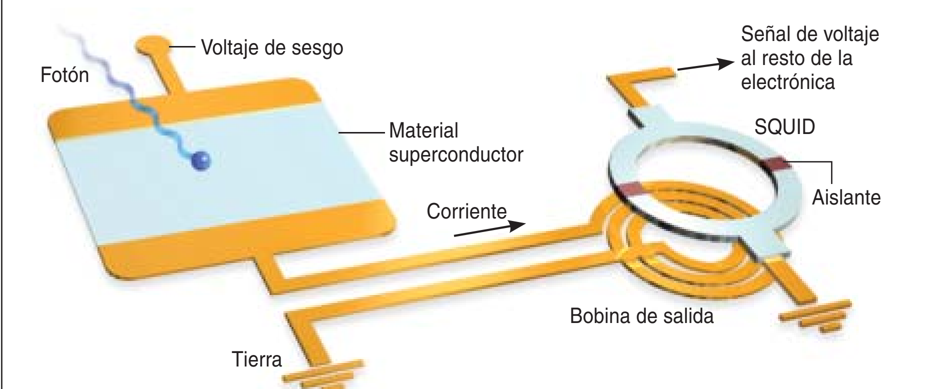


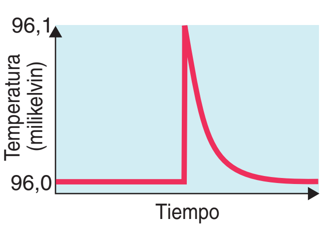
Hay dos clases principales de detectores superconductores de fotones: los térmicos y los de rotura de pares. En ambos tipos, la energía de un fotón individual (y por lo tanto su frecuencia) se revela por la intensidad de la señal de salida del dispositivo. A la izquierda se ve una matriz de 64 píxeles de sensores térmicos que se utiliza simultáneamente como cámara de rayos X y espectrómetro de rayos X de alta resolución. Los circuitos a su derecha son los de un multiplexor SQUID (*descrito abajo*).

DETECTORES TERMICOS

Los detectores térmicos superconductores más comunes son los sensores de borde de transición. Se los enfría a la temperatura central del muy estrecho rango de temperaturas en que su material activo cambia de superconductor a normal (*gráfico superior*). Un voltaje de sesgo lo estabiliza a esa temperatura de transición y genera un flujo estacionario de corriente. Al absorber un fotón, el sensor se calienta brevemente en una cantidad minúscula (*gráfico inferior*), lo que da lugar a un aumento significativo de la resistencia del sensor. Un dispositivo superconductor, un SQUID, detecta la correspondiente caída momentánea de la corriente y convierte esta señal en un pulso de voltaje que se amplifica por medios electrónicos corrientes antes de la recogida de datos.







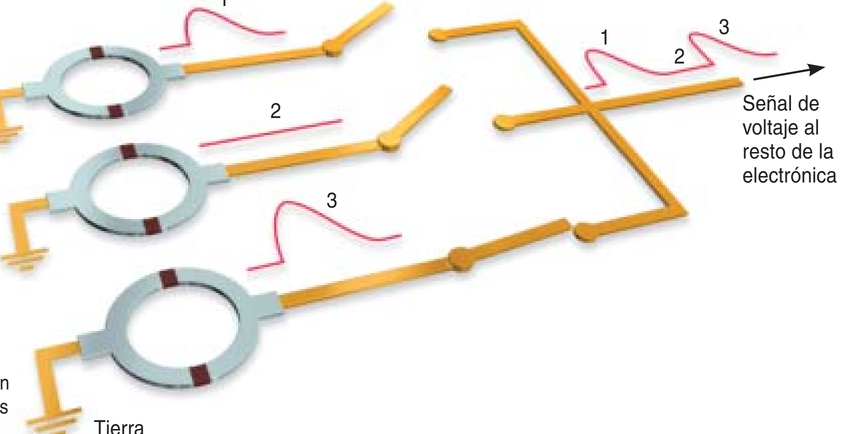
DETECTORES DE ROTURA DE PARES

El otro tipo de sensores se enfría hasta bien dentro de su fase superconductora, en la que sus electrones forman pares de Cooper. Un único fotón tiene energía bastante para romper millares de pares de Cooper, que se fragmentan en electrones excitados a los que se denomina cuasipartículas (*izquierda*). Aunque el material sigue siendo superconductor, es posible detectar las cuasipartículas porque, al contrario que los pares de Cooper, atraviesan una barrera aislante gracia al efecto túnel cuántico, produciendo así un pulso de carga que pasa a los componentes electrónicos ordinarios (*derecha*).

Fotón
Superconductor
Las cuasipartículas atraviesan la barrera aislante por efecto túnel
Señal de carga al resto de la electrónica
Par de Cooper
Cuasipartícula
Tierra
Aislante

FORMACION DE UNA IMAGEN POR MULTIPLEXADO

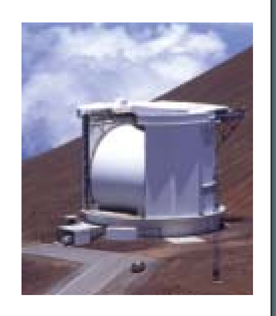
Generan la imagen extensas matrices de detectores. Para ello, todas las señales de salida de los detectores deben combinarse en un número más pequeño de líneas de datos, proceso conocido como multiplexado. Por ejemplo, en el multiplexado por división temporal de los sensores de borde de transición, las salidas de un cierto número de SQUID se conectan a una línea de datos. Los SQUID funcionan como interruptores que se cierran de uno en uno; el patrón de señales de los detectores se convierte así (*1-3*) en una secuencia de pulsos. Los componentes electrónicos que se encuentran más adelante identifican qué pulsos corresponden a cada detector gracias a su exacta temporización.

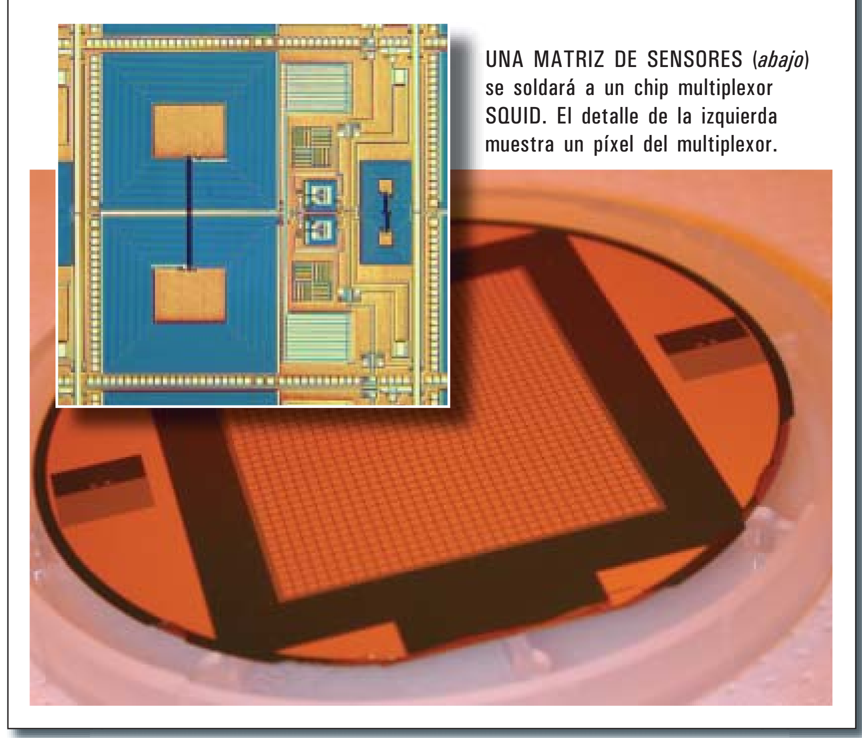


SLIM FILMS (*ilustración*); DANIELA NAOMI MOLNAR (*gráficas*); KENT D. IRWIN (*fotografía*)

ASTRONOMIA SUBMILIMETRICA

Las observaciones astronómicas en las longitudes de onda algo más cortas que un milímetro llegan a regiones interiores de las nubes moleculares que permanecen ocultas a otras longitudes de onda. Esas regiones son centros de formación de planetas, estrellas y galaxias. Este espinoso rango de longitud de ondas será mucho más accesible gracias a la cámara SCUBA-2, que se instalará en el telescopio James Clerk Maxwell (*derecha*), en Mauna Kea, Hawai, en 2007. Lleva ocho matrices de 1280 sensores del tipo de borde de transición.





UNA MATRIZ DE SENSORES (*abajo*) se soldará a un chip multiplexor SQUID. El detalle de la izquierda muestra un píxel del multiplexor.

como detector de energía total de la radiación en las bandas infrarroja y milimétrica.

Los primeros detectores SBT se crearon en los años cuarenta. Durante años, resultaron inviables. El problema era que la transición superconductora tiene a menudo menos de una milésima de grado de ancho; costaba mucho mantener la temperatura del dispositivo dentro de tal intervalo. Cuando hacía el doctorado con Blas Cabrera, en la Universidad de Stanford, nuestro grupo de investigación preparaba baterías de detectores SBT para experimentos dirigidos a estudiar los neutrinos procedentes de reactores nucleares y a detectar la materia oscura. Conseguimos que algunos detectores SBT funcionaran, pero pequeñas variaciones en la temperatura de transición de los diversos sensores imposibilitaban que funcionaran como una batería de sensores a la misma temperatura.

En 1993 me percaté de que bastaba un simple truco para resolver el problema: aplicar un voltaje constante a través de los detectores, un "voltaje de sesgo" que produce a través del SBT una corriente eléctrica que calienta el detector. Cuando se alcanza la temperatura de transición, la resistencia aumenta, disminuye la corriente y cesa el calentamiento. El autocalentamiento actúa así como una retroalimentación negativa, que tiende a mantener la temperatura de la película por debajo de la de transición.

En una batería de sensores con voltaje de sesgo, cada sensor se autocalentará hasta su propia transición, aunque las temperaturas de transición varíen ligeramente. La introducción del voltaje de sesgo ha conducido a un crecimiento explosivo del desarrollo de baterías de detectores SBT en todo el mundo.

Contar cuasipartículas

A diferencia de lo que sucede en un sensor térmico, un detector superconductor de rotura de pares no señala la absorción de un fotón con un cambio de la resistencia eléctrica. Un fotón entrante rompe los pares de Cooper y crea cuasipartículas que, para la mayoría de los propósitos, pueden concebirse como electrones libres en un metal que, por lo demás, es superconductor. El número de cuasipartículas creadas es proporcional a la energía del fotón. Puesto que el detector está enfriado por debajo de su temperatura de transición, persiste todavía un mar de pares de Cooper intactos, por cuyo motivo la resistencia eléctrica sigue siendo cero. Un detector superconductor de rotura de pares debe, por tanto, poder distinguir entre pares de Cooper y cuasipartículas.

Tiene esa capacidad la unión túnel superconductora, dos películas superconductoras separadas por una capa delgada de material aislante. Si el aislante es lo bastante delgado (cerca de dos nanómetros), los electrones podrán cruzar de un lado al otro de la barrera gracias a un fenómeno mecanocuántico, el efecto túnel. La aplicación de un pequeño campo magnético hará que los pares de Cooper dejen de atravesar la unión por medio del efecto túnel; sólo las cuasipartículas la cruzarán. Si se aplica entonces un voltaje al dispositivo, ninguna corriente fluirá hasta que una de las películas superconductoras absorba un fotón, generando cuasipartículas. El pulso de corriente resultante es proporcional al número de cuasipartículas creadas y, por tanto, a la energía y la frecuencia del fotón.

Un equipo dirigido por Jonas Zmuidzinas, del Instituto de Tecnología de California, y Peter Day, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, está desarrollando otro dispositivo para medir el número de cuasipartículas en un superconductor. Se le conoce por "detector de microondas por inductancia cinética ". El dispositivo en cuestión saca partido de un hecho: una estructura supercon-

NIK SZYMANEK (*telescopio*); GENE HILTON *NIST* (*chips*)

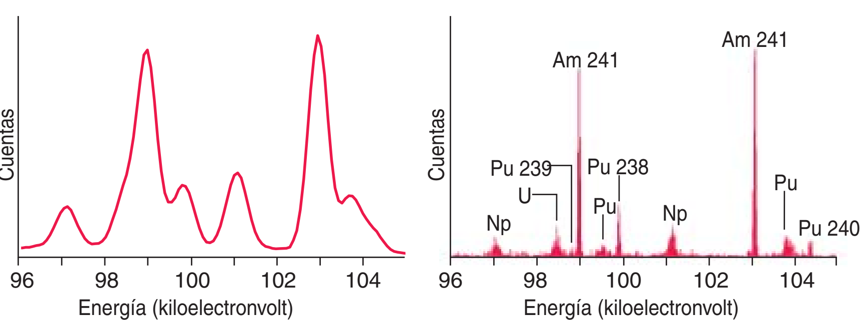
ductora puede tener una resonancia electromagnética a una frecuencia de microondas, tal y como un diapasón experimenta una resonancia mecánica a una frecuencia de audio. (El diapasón vibra, el superconductor admite una corriente eléctrica oscilante.)

Cuando los fotones crean cuasipartículas en el superconductor, la resonancia se hace menos aguda y la propagación de la onda se frena, con una reducción de la frecuencia de resonancia. Los cambios en frecuencia y en agudeza de la resonancia son proporcionales al número de cuasipartículas. Los resultados iniciales de estos dispositivos son sumamente prometedores.

Los detectores superconductores individuales tienen su utilidad para algunas aplicaciones, para el análisis de materiales por ejemplo, pero una toma de imágenes práctica requiere una gran batería de detectores o píxeles, como en el CCD de una cámara digital. Se tropieza con un problema al conectar la batería de detectores ultrafríos a los demás elementos electrónicos del aparato, que estarán a temperatura ambiente: si se saca un cable de cada píxel, fluirá demasiado calor por el cableado y desaparecerá la superconductividad de los detectores. Mejor es dotar de circuitos a la parte ultrafría del dispositivo, para que las señales de muchos píxeles se combinen, o "multiplexen", en unos pocos cables que se dirijan a la parte caliente.

Las ordenaciones superconductoras multiplexadas más avanzadas llevan detectores SBT. Según lo explicado más arriba, cuando un SBT absorbe un fotón la corriente que recorre el detector cambia. Pero esa corriente es muy pequeña, de manera que para medirla se conecta cada píxel a un dispositivo superconductor de interferencia cuántica, o SQUID, cuya sensibilidad sólo viene limitada por la mecánica cuántica [*véase* "Superconductores de interferencia cuántica", por John Clarke; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1994]. El SQUID traduce el pequeño pulso de corriente en una señal de voltaje lo bastante grande para que pueda medirse con medios electrónicos corrientes. Cabe multiplexar las salidas de muchos SQUID sumando sus voltajes y alimentando el resultado en un solo cable. Sin embargo, para que se puedan distinguir las señales de cada detector, debe hacerse algo más. En el multiplexado de división de tiempo se activan los SQUID uno a uno, mientras que en multiplexado de división de frecuencia los detectores funcionan a distintas frecuencias, lo que permite la posterior separación de sus señales.





2. HOY DIA, SE RASTREA EN PUERTOS Y ADUANAS con detectores el contrabando de material radiactivo (*fotografía*). Los detectores semiconductores ordinarios no distinguen isótopos distintos en una muestra de prueba (*gráfico de la izquierda*). Un detector superconductor, en cambio, resuelve con nitidez todas las líneas (*gráfico de la derecha*) y descubre la presencia de plutonio 239, el isótopo preferido para las armas nucleares.

También se pueden multiplexar los píxeles de un detector de inductancia cinética de microondas (el tipo que oscila como un diapasón) sintonizándolos a distintas frecuencias de resonancia, conectándolos todos en paralelo y leyéndolos con un transistor frío y una línea de salida conectada a un amplificador a temperatura ambiente. El multiplexado de grandes ordenaciones de detectores de unión túnel hasta ahora ha resultado difícil. Nuevas técnicas de lectura de microondas quizá podrían hacer viables tales matrices.

Miríadas de aplicaciones

Los detectores superconductores hoy disponibles son de 10 a 100 veces más sensibles que los detectores ordinarios que funcionan a temperatura ambiente. Están mejorando las mediciones en numerosos campos.

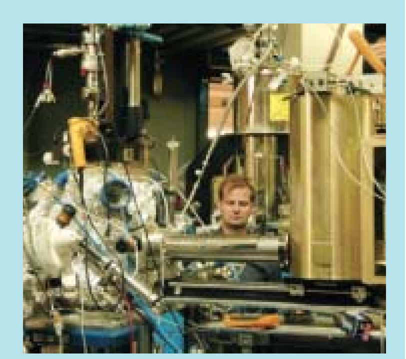
No proliferación nuclear y defensa nacional. Apremia la vigilancia de materiales nucleares que terroristas o estados incontrolados puedan emplear. Los materiales nucleares con-

DANIELA NAOMI MOLNAR; FUENTE: JOEL ULLOM *NIST* Y MICHAEL RABIN *Laboratorio Nacional de Los Alamos (gráficas)*; MEL EVANS *AP Photo (fotografía)*

Otros usos

Además de las aplicaciones citadas en el texto principal, los detectores superconductores encuentran uso en:

- Espectroscopía de rayos X en sincrotrones (*derecha*); incluye el análisis químico de metales en proteínas y otras muestras.
- Detección eficiente de grandes polímeros biológicos y fragmentos de ADN en espectrómetros de masas; tiene aplicaciones en genómica, proteómica, descubrimiento de medicamentos y análisis de compuestos naturales.
- Conteo de fotones a las longitudes de onda de las telecomunicaciones (infrarrojas) para criptografía cuántica.
- La búsqueda de las partículas masivas que interaccionan débilmente; se supone que forman la materia oscura del universo.



EXPERIMENTO en un sincrotrón del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley.

tienen isótopos inestables que emiten rayos X y gamma. Las energías características de estos fotones proporcionan una huella que revela qué isótopos radiactivos están presentes. Por desgracia, algunos isótopos con usos pacíficos emiten rayos gamma de energías muy parecidas a las de los fotones emitidos por materiales utilizados en armas, lo que conduce a identificaciones ambiguas y a falsas alarmas.

Por eso EE.UU. está instalando millares de arcos detectores de radiación; captarían los rayos gamma de materiales nucleares transportados por vehículos que cruzasen las fronteras canadiense y mexicana. A pocas cosas se tiene más miedo que a un contrabando de uranio altamente enriquecido con el grado de pureza requerido para una bomba; valdría para construir una burda bomba atómica, semejante a la de Hiroshima [*véase* "Almacenamiento seguro del uranio altamente enriquecido", por Alexander Glaser y Frank N. von Hippel; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2006]. La principal señal del uranio altamente enriquecido es el rayo gamma de 185,7 kiloelectronvolt (keV) del uranio 235. Este rayo gamma, sin embargo, tiene casi la misma energía que el rayo gamma de 186,1 keV emitido por el radio 226 de las arcillas absorbentes y desodorantes para gatos domésticos; también otros materiales desprenden radiación así. Resulta muy difícil distinguirlos. Es la principal fuente de falsas alarmas en la frontera de EE.UU.

Dos equipos, dirigido uno por Michael Rabin, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y Joel Ulloa, del Instituto Nacional de Pesos y Medidas, en Boulder, y el otro del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, han desarrollado detectores de rayos gamma SBT con una resolución de energías que decuplica con creces la de los detectores comunes. Resuelven más líneas en el complicado espectro de rayos gamma de los materiales nucleares, por ejemplo en las mezclas isotópicas del uranio y del plutonio (*véase la figura 2*). Se están preparando estos aparatos para que, determinando el contenido de plutonio del combustible nuclear, ayuden a la verificación de los tratados internacionales de no proliferación. Pero también distinguen entre el radio 226 de los absorbentes para gatos y el uranio 235 del uranio altamente enriquecido. Si un detector manual común o un arco de detección recibiesen una señal de rayo gamma, cabría recurrir a continuación a un dispositivo superconductor para determinar inequívocamente de cuál de los dos isótopos se trataba, eliminando así muchas falsas alarmas.

Análisis de microchips. Una aplicación importante para los fabricantes de semiconductores es el microanálisis con sonda de electrones. Cuando el haz de electrones de un microscopio electrónico de barrido examina una muestra, ésta emite rayos X. Se puede determinar la composición química de la muestra en la escala de los nanómetros —la del haz— midiendo las diferentes energías de esos rayos X que va emitiendo. A medida que el haz barre toda la muestra, la imagen resultante nos indica dónde se encuentran las distintas composiciones químicas, cartografiando así las estructuras que definen el funcionamiento del microchip.

Los fabricantes de semiconductores utilizan detectores de rayos X de semiconductores para estudiar las estructuras y defectos de los microchips. Conforme los microchips van incorporando elementos más pequeños, se necesitan nuevas generaciones de instrumentos de microanálisis con mayor sensibilidad. Mi grupo del Instituto Nacional de Pesos y Medidas desarrolla sistemas de microanálisis basados en detectores SBT que alcanzan una resolución, en la medición de la energía, 50 veces mejor que la de los detectores semiconductores empleados por la industria; les permite resolver muchos picos importantes del espectro de rayos X. Empieza ya a estar a la venta este tipo de sistemas de microanálisis.

Astronomía submilimétrica. La astronomía ofrece abundantes oportunidades a los detectores superconductores. A menudo han sido los astrónomos quienes han guiado la creación de nuevas técnicas de detección, movidos por su necesidad de medir señales muy débiles de objetos distantes.

Mi grupo del NIST colabora con el Centro de Tecnología Astronómica de Edimburgo, con Raytheon Vision Systems, de Goleta, y con universidades del Reino Unido y del Canadá para desarrollar la cámara superconductora SCUBA-2, que equipará al telescopio James Clerk Maxwell, en la cumbre de Mauna Kea, en Hawai. SCUBA-2 reemplazará a la Red Bolométrica Submilimétrica de Usuarios (SCUBA), una batería de detectores que funcionan con semiconductores construida por el Centro de Tecnología Astronómica. SCUBA obtiene imágenes de regiones donde se forman planetas, estrellas y galaxias mediante la detección de rayos de longitudes de

STEPHAN FRIEDRICH *Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore y de Berkeley*

onda submilimétricas, más cortas que las microondas y más largas que la luz visible.

Hasta hace poco, esta gama de longitudes de onda era, en gran parte, inaccesible: la energía de fotones de la banda submilimétrica se queda corta para crear excitaciones electrónicas en semiconductores y su frecuencia es demasiado alta para que la amplifiquen eficazmente receptores análogos a los de radio. Pero vale la pena analizar esa banda, ya que contiene el 98 por ciento de los fotones emitidos desde la gran explosión. Entre otras características, permite observar regiones internas de las nubes moleculares, ocultas para otras longitudes de onda. SCUBA registra los fotones por el calentamiento de sus 128 píxeles semiconductores congelados, proceso más lento y mucho menos sensible que la técnica superconductora de SCUBA-2.

SCUBA-2 constará de más de 10.000 píxeles detectores SBT leídos con multiplexores superconductores. Tomará imágenes de los objetos astronómicos hasta mil veces más deprisa. Ya se ha construido un prototipo de subconfiguración de 1280 píxeles de SCUBA-2. Se prevé que la cámara completa se instalará en el telescopio en 2007. Se están preparando muchos otros sistemas de detectores superconductores de ondas submilimétricas y milimétricas para distintos observatorios y satélites.

Cosmología. Algunos de los descubrimientos más importantes de estos últimos años sobre el universo han venido de mediciones del fondo cósmico de microondas (FCM). Los fotones del FCM conforman una instantánea del universo a los 400.000 años de la gran explosión, porque durante los siguientes trece mil millones de años la mayoría de tales partículas ha atravesado el universo sin que nada las perturbase. Las ondas acústicas del plasma del universo primitivo inscribieron en el FCM patrones hoy perceptibles [*véase* “La sinfonía cósmica”, por Wayne Hu y Martin White; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2004].

Las mediciones de tales pautas, junto con otras observaciones cosmológicas, han demostrado que sólo alrededor del 5 por ciento del universo actual se compone de la materia y la energía ordinarias; cerca del 22 por ciento es materia oscura y el 73 por ciento restante, un campo misterioso al que nos referimos como energía oscura.

Además de los patrones de las ondas acústicas, debe de haber otros más sutiles, impresos en la polarización de la radiación del FCM por las ondas gravitacionales que se generaron durante el período exponencial —o “inflación cósmica”— de la expansión del universo; configurarían un “fondo cósmico de ondas gravitacionales”. (En la luz polarizada, el campo eléctrico de la onda electromagnética está alineado de una manera determinada, en vez de oscilar aleatoriamente en todas direcciones.) La radiación del FCM se generó al colisionar la radiación con el plasma primordial, de manera parecida a como la luz visible se polariza cuando se refleja en una superficie.

Pronto se buscará el fondo cósmico de ondas gravitacionales con detectores superconductores sensibles a la polarización. Al principio serán telescopios especializados los que, tanto en tierra como en globos a elevada altitud, se valdrán de tales dispositivos. Para más adelante, la NASA proyecta la construcción de un satélite, la “Sonda de la Inflación”, que efectuará las mediciones definitivas de la polarización del FCM. La medición correcta de estos patrones de las ondas de gravedad informará de la física que funcionó en la primera billonésima de billonésima de billonésima de segundo después de la gran explosión, cuando las interacciones ocurrían a unas escalas de energía en las que todas las fuerzas, excepto la gravedad, estaban unificadas.

Desde los días de Albert Einstein, los físicos vienen soñado con investigar directamente esa “gran unificación”, pero los mayores aceleradores de partículas tienen una energía un billón de veces demasiado pequeña. Gracias a los detectores superconductores, se podrá aprovechar el laboratorio del cosmos para acceder a escalas de energía que siempre estarán fuera del alcance de los experimentos terrestres.

Matrices gigantes

A pesar de los grandes avances de los detectores superconductores durante la última década, aún no se ha llegado a sacar de ellos todo el potencial que encierran. La capacidad de los CCD no se notó verdaderamente hasta que no se tomaron imágenes con matrices enormes de píxeles. Más adelante habrá grandes matrices de detectores superconductores —de 10.000 píxeles para las longitudes de onda milimétricas, de millones de píxeles para la banda de los rayos X— gracias a nuevas técnicas de fabricación y al multiplexado de señales a las frecuencias de microondas, que permitirá que muchos más píxeles sean leídos por un solo cable.

Para enfriar estos conglomerados de detectores se están desarrollando sistemas criogénicos más pequeños y baratos. Estas poderosas matrices superconductoras resultarán útiles en una gama más amplia todavía de disciplinas. Las matrices seguirán teniendo menos “píxeles” que la retina humana, pero aun así abrirán a nuestra visión nuevos y apasionantes ámbitos.

El autor

Kent D. Irwin dirige el programa de sensores cuánticos del Instituto Nacional de Pesos y Medidas (NIST) y enseña astrofísica y ciencia planetaria en la Universidad de Colorado en Boulder. Su equipo ha recibido la medalla de oro del Departamento de Comercio y el premio del NIST de investigación aplicada por su trabajo con los detectores superconductores.

Bibliografía complementaria

LOW-TEMPERATURE PARTICLE DETECTORS. Norman E. Booth, Blas Cabrera y Ettore Fiorini en *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science*, vol. 46, págs. 471-532; 1996.

QUANTUM CALORIMETRY. Caroline K. Stahle, Dan McCammon y Kent D. Irwin en *Physics Today*, vol. 52, n.º 8, págs. 32-37; agosto 1999.

SEEING SINGLE PHOTONS. Graham P. Collins en *Scientific American*, vol. 290, n.º 1, páginas 24-25; enero 2004.

TRANSITION-EDGE SENSORS. K. D. Irwin y G. C. Hilton en *Cryogenic Particle Detection*. Dirigido por Christian Enss. Springer Verlag, 2005.

Sistemas cuasibidimensionales

La agregación de la materia en un número restringido de dimensiones impide la existencia de orden cristalino. En cambio, favorece la aparición de estructuras con un orden parcial. Podrían resultar muy útiles para la fabricación de nanodispositivos

Jordi Ignés Mullol

Denominamos cuasibidimensional a cualquier sistema que, si bien se extiende en las tres dimensiones del espacio, satisface que la tercera dimensión pueda ser ignorada a efectos de describir la configuración de sus componentes y otras propiedades fisicoquímicas. Las letras dispuestas sobre la página de esta revista o los adoquines en las calles del barrio antiguo de una ciudad son ejemplos de sistemas cuasibidimensionales. Sin embargo, aquí nos referiremos a situaciones en las cuales la cuasibidimensionalidad existe ya en escalas microscópicas.

Abundan los ejemplos de gran interés, fundamental y técnico: las capas monomoleculares adsorbidas en la superficie de un sólido o un líquido; las películas de cristales líquidos esmécticos, cuyas moléculas se organizan espontáneamente en capas; los coloides, formados por la suspensión de partículas de diámetro entre 10 y 100 nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) en un medio fluido y confinados entre dos placas sólidas; los electrones o iones confinados en la superficie del helio líquido; los superconductores de alta temperatura formados por el apilamiento de capas superconductoras de óxido de cobre separadas por un medio aislante que restringe su desplazamiento a todos los efectos a sólo una capa, etcétera.

En la actualidad, la investigación en ciencia de materiales, biotecnología y sistemas de la información se propone entender y controlar la estructura y la dinámica de sistemas a escalas nanométricas. Esta *nanotecnia* persigue la construcción de dispositivos con propiedades que se controlen a escala molecular; así, biosensores basados en la preparación de superficies sensibles a un complejo enzimático específico, o recubrimientos que modifiquen el comportamiento óptico de superficies. Las propiedades de estos sistemas se determinan, en muchas ocasiones, a partir de la configuración de capas de pocos nanómetros de grosor [*véase el número monográfico* “Nanotécnica, la nueva ingeniería”; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2001].

Orden y dimensión

En nuestra experiencia cotidiana tratamos, sobre todo, con sistemas y materiales tridimensionales. A nuestra intuición no le cuesta aceptar el modelo que describe la estructura de un sólido cristalino: un conjunto de átomos o moléculas que se distribuyen ordenada y repetidamente sobre los puntos de una red que se extiende por las tres dimensiones del espacio. Los sólidos reales presentan variaciones respecto a la estructura ideal, debido a defectos particulares, en los que los puntos de la red están vacíos o no todos los átomos caen en ella, a dislocaciones en las que filas enteras de átomos están descolocadas, etcétera. No obstante, existe en ellos un orden de largo alcance, en posición y orientación, donde, en promedio, las moléculas se distribuyen de forma regular y uniforme por todas las direcciones del espacio, sea cual sea el punto de referencia que tomemos dentro del sólido. Aunque las moléculas que componen un sólido cristalino vibran a causa de la continua agitación térmica en torno al punto de equilibrio neutro definido por su posición en la red, el *orden* definido por la malla cristalina ideal se mantiene al promediar un sistema con trillones de átomos.

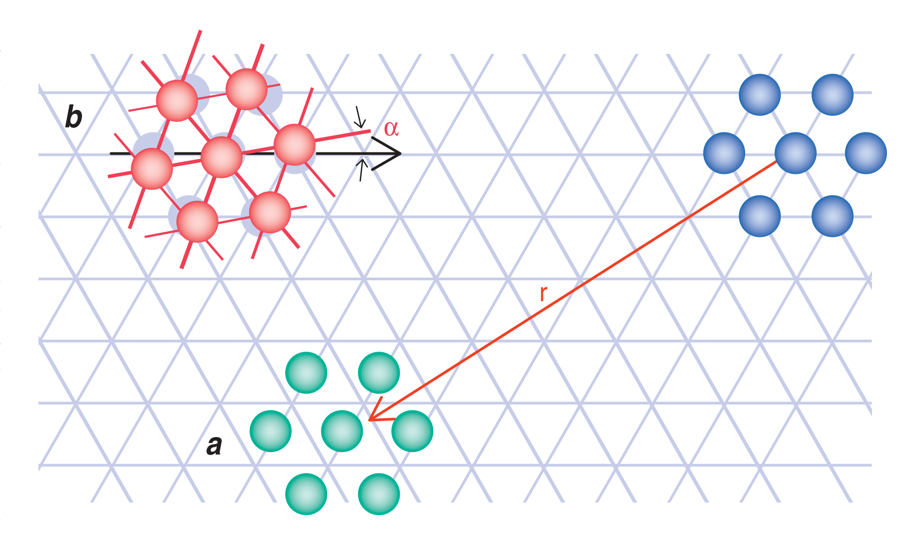
Sabemos que si un sólido cristalino, un trozo de hielo por ejemplo, se calienta más allá de una temperatura característica, la consistencia estructural se desmoronará y el sólido se fundirá. Esta *transición de fase* trae consigo efectos muy notables: entre otras magnitudes, cambian la densidad (el hielo, menos denso, flota sobre el agua) y la entropía (función termodinámica que guarda relación directa con el orden existente en el sistema y cuyo valor es menor en el cristal).

No pueden contrastar más la organización de las moléculas en la fase líquida y la descrita para la fase cristalina. Apenas existe orden de corto alcance en la fase líquida,

pues la *correlación* entre la posición de una molécula y sus vecinas en el volumen del líquido decrece exponencialmente al alejarnos de la molécula. Entre la fase cristalina, totalmente ordenada, y la líquida, desordenada, cabe la posibilidad de una situación intermedia: fases termodinámicamente estables en las que, si bien existe un desorden posicional análogo al de la fase líquida, las moléculas prefieren orientarse en la misma dirección que sus vecinas. En otras palabras: fases en las que existe un *orden orientacional* de "casi largo" alcance. Estas son las fases de cristal líquido descubiertas a finales del siglo XIX por el botánico austríaco Friedrich Reinitzer y bautizadas como *mesofases* por el químico francés Georges Friedel a principios del siglo XX.

Dicho comportamiento está reservado a un reducido grupo de sustancias, en su mayoría sintéticas (aunque existen notables ejemplos de sustancias liquidocristalinas naturales, como los derivados del colesterol). Tiene particular interés la anisotropía óptica de estos materiales: la luz los atraviesa a diferente velocidad según esté orientado su plano de vibración (su polarización) con respecto a las moléculas del material. Este es precisamente el origen de gran parte de las aplicaciones técnicas de los cristales líquidos. Como veremos más adelante, en los sistemas cuasibidimensionales son habituales las fases con orden orientacional, incluso en los más simples.

Sabemos ya que el grado y el tipo de orden posible de un sistema dependen de su dimensión espacial. Así, las vibraciones que la agitación térmica imparte siempre a las moléculas a escalas microscópicas son compatibles con el orden cristalino en tres dimensiones; sin embargo, impiden que exista un orden posicional de largo alcance en los sistemas bidimensionales. Al hablar de orden de largo alcance nos referimos a que la organización de las moléculas alrededor de un punto de referencia no varíe de forma importante por grande que sea el contorno considerado. Esta idea se puede expresar estadísticamente diciendo que la probabilidad de encontrar moléculas a una distancia *r* de un punto de la red cristalina sigue condicionada a que haya una molécula en dicho punto, incluso para *r* del valor que se quiera.



1. ORDEN POSICIONAL Y ORIENTACIONAL en un cristal hexagonal en dos dimensiones. Se pierde el orden posicional cuando zonas del cristal que se encuentran a una distancia *r* de la zona de referencia presentan átomos colocados fuera de la malla de referencia, aunque sigan alineados paralelamente a dicha red (*a*). El orden orientacional está relacionado con la disposición de las filas de átomos. Existe orden orientacional si dichas filas están orientadas de la misma forma en regiones separadas una cierta distancia. Para cuantificar el orden orientacional definimos enlaces imaginarios entre cada átomo y sus vecinos más cercanos (seis en la red hexagonal perfecta). Estos enlaces constituyen el parámetro de orden orientacional de enlace. Si, a determinada distancia, los enlaces se hallan girados cierto ángulo α respecto a la región de referencia, hablaremos de destrucción del orden orientacional (*b*).

JORDI IGNES MULLOL

Por el contrario, si la estructura del entorno de una molécula varía a medida que nos alejamos de ella, diremos que el orden de largo alcance se pierde. En términos estadísticos, esa pérdida del orden de largo alcance se caracteriza por lo siguiente: la probabilidad de encontrar moléculas a una distancia *r* de un punto de referencia, mientras *r* sea algo mayor que la separación media entre las moléculas, es *independiente* de que haya o no una molécula en ese punto. Es decir, las disposiciones de los átomos a distancias mayores que *r* no están correlacionadas.

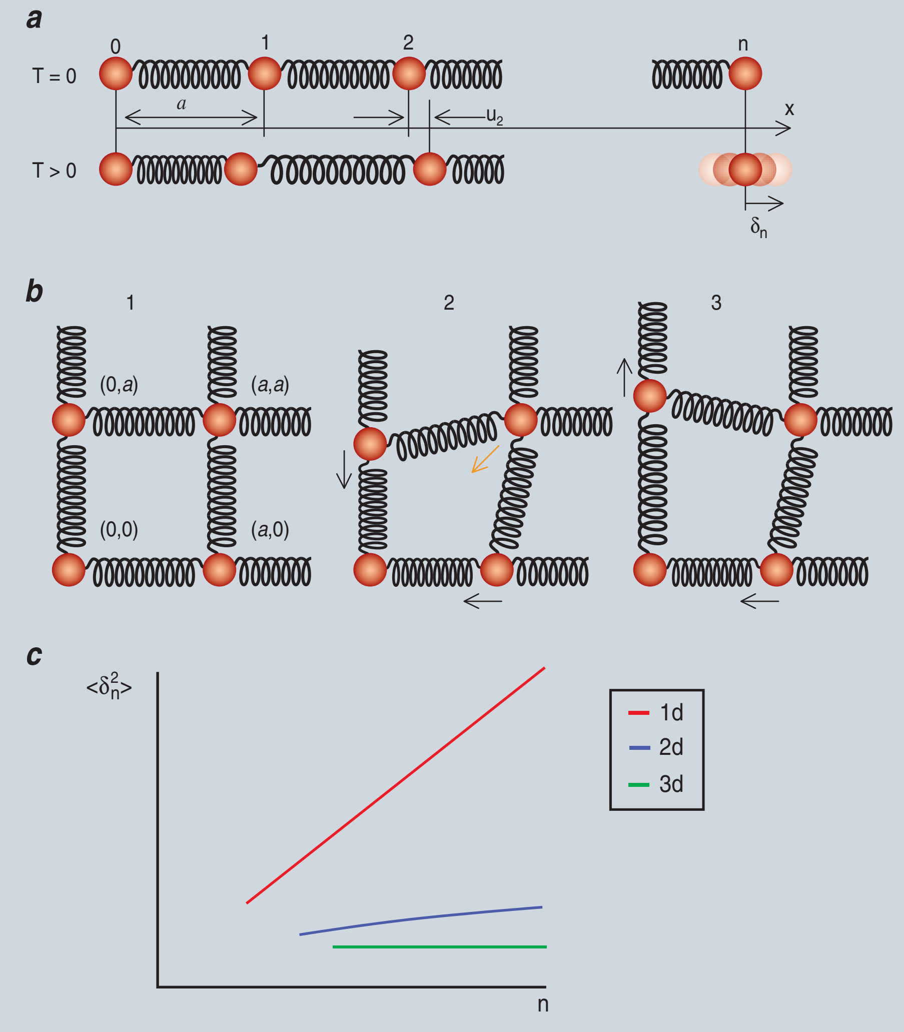
Se acostumbra cuantificar esta idea mediante una *función de correlación* para un parámetro que caracterice el tipo de orden en cuestión. Por ejemplo, la función de correlación densidad-densidad cuantifica el orden posicional del sistema. Si dicha función no se anula al aumentar indefinidamente la distancia entre dos partes del sistema, hablaremos de orden posicional de largo alcance. Si decrece conforme al inverso de una potencia de la distancia, se hablará de un orden posicional de casi-largo alcance. Finalmente, si la función de correlación cae como el inverso de una exponencial de la distancia, tendremos un orden posicional de corto alcance.

La fase hexática

La imposibilidad del orden posicional de largo alcance en los sistemas bidimensionales no impide, tal y como explicó David Mermin hacia 1970, que pueda haber en ellos un orden orientacional de largo alcance. Hubo que esperar casi diez años para que esta idea abstracta se tradujera en un modelo teórico concreto de fase con orden de largo alcance *orientacional* pero no posicional. Sus descubridores, David R. Nelson y Bertrand I. Halperin, le dieron el nombre de "fase hexática". Unos años antes, Mike Kosterlitz y David Thouless habían propuesto un mecanismo de la fusión de un sólido bisimensional, a cuyo análisis contribuyó también Peter Young. Esta explicación del paso de cristal bidimensional a líquido isótropo bidimensional recibe la denominación de modelo de KTHNY, por las iniciales de sus autores.

El orden cristalino en una, dos y tres dimensiones

UNA CARACTERISTICA de los sólidos cristalinos, que los distingue de los líquidos isótropos o los sólidos amorfos, es la regularidad en la distribución de los átomos que los componen (su orden de largo alcance). Podemos intentar cuantificar el orden de forma simplificada imaginándonos la siguiente situación unidimensional (*esquema a*): una cadena de átomos que, en ausencia de agitación térmica (cero absoluto de temperatura), se disponen con un espaciado entre átomos *a* para el cual la energía acumulada en el sistema es mínima. Es útil, y una aproximación muchas veces válida, representar la interacción entre átomos por muelles que los unen. Consideremos, además, que cada átomo sólo nota la presencia de sus vecinos más próximos (dos en el caso unidimensional). A temperatura finita, todos los átomos vibran aleatoriamente alrededor de su posición de equilibrio. Así, la posición del átomo número 1 oscilará con el tiempo según un valor $u(t)$. En promedio, se separa de su posición de equilibrio una distancia δ. La posición con respecto al origen (átomo número 0) del enésimo átomo, que sólo notará la presencia de sus dos vecinos e intentará mantener la distancia correcta respecto a ellos, habrá acumulado las desviaciones respecto a la posición de equilibrio de los $n-1$ átomos precedentes. Utilizando las leyes de la estadística, encontramos que las fluctuaciones en la posición del enésimo átomo respecto al origen son del orden de $n^{1/2}\delta$. Aunque δ, que crece suavemente con la temperatura, sea pequeño comparado con *a*, el error acumulado llegará a superar el valor *a* para *n* suficientemente grande. Cuando esto ocurra, la correlación periódica de la cadena se habrá perdido: la posición del enésimo átomo no podrá predecirse conociendo la posición del átomo 0 y la distancia de equilibrio *a*. La agitación térmica llega a destruir el orden de largo alcance. Este resultado, sin embargo, es diferente para las redes en dos y tres dimensiones. Imaginemos el caso simple de una red cuadrada (*esquema b*), en la que los átomos se sitúan en los vértices de cuadrados de lado *a*. Consideremos la interacción del átomo situado en las coordenadas (*a*,*a*) con sus vecinos (*a*,0) y (0,*a*), los cuales, a su vez, interaccionan con el átomo (0,0). Cuando (*a*,0) y (0,*a*) fluctúan en la misma dirección y se acercan al origen (0,0) se favorece mucho el acercamiento del átomo (*a*,*a*). En cambio, si un átomo se aleja y el otro se acerca al origen, el acercamiento del átomo (*a*,*a*) al origen será, en promedio, menor. La idea es: la amplitud de las fluctuaciones en la posición de un átomo respecto al origen será menor, en promedio, cuando aumenten los caminos que lo enlazan con el origen. El número de dichos caminos es incluso mayor en tres dimensiones. Según este argumento, la destrucción del orden de largo alcance por las fluctuaciones resulta cualitativamente diferente en una, dos o tres dimensiones. También cabe argumentar cuantitativamente, siempre y cuando a la hipótesis de que sólo se interacciona con los vecinos inmediatos se le añada una simplificación: suponer que las fuerzas de interacción son armónicas (es decir, si se idealiza la red de átomos suponiendo que los unen muelles sin masa). Conforme al principio termodinámico de equipartición de la energía, y para valores de *n* grandes, se calcula el valor promedio del error cuadrático introducido por las vibraciones térmicas, $\langle\delta_n^2\rangle$. Se llega al resultado ilustrado en el esquema *c*. Las fluctuaciones en la distancia promedio entre dos puntos crecen rápidamente con esa misma distancia en una dimensión, más lentamente en dos y no crecen en tres; en este último caso, pues, se preserva el orden cristalino. Este argumento aproximado, expuesto por Rudolf Peierls en su libro *Surprises in Theoretical Physics*, conduce al resultado correcto: el orden a grandes distancias sólo es posible en tres dimensiones. En sistemas bidimensionales sólo un orden de menor alcance es posible, mientras que en una dimensión el orden se desvanece a cortas distancias.



A diferencia de lo que se observa en los sistemas tridimensionales, donde el acercamiento a la temperatura de fusión provoca bruscamente el cambio de sólido cristalino a líquido isótropo, en los sistemas bidimensionales se tiene un proceso gradual. Se generan *errores* en la red cristalina bidimensional, debido a los cuales algunos átomos tienen siempre un número anómalo de primeros vecinos: se forman dislocaciones elementales. En realidad, éstas siempre aparecen en pares: mientras que uno de los átomos en el núcleo de la dislocación tiene un vecino en exceso, un átomo adyacente lo tendrá en defecto. Como consecuencia, se generan zonas donde los átomos se encuentran fuera de la malla cristalina. La proliferación de dislocaciones destruye el orden cristalino bidimensional.

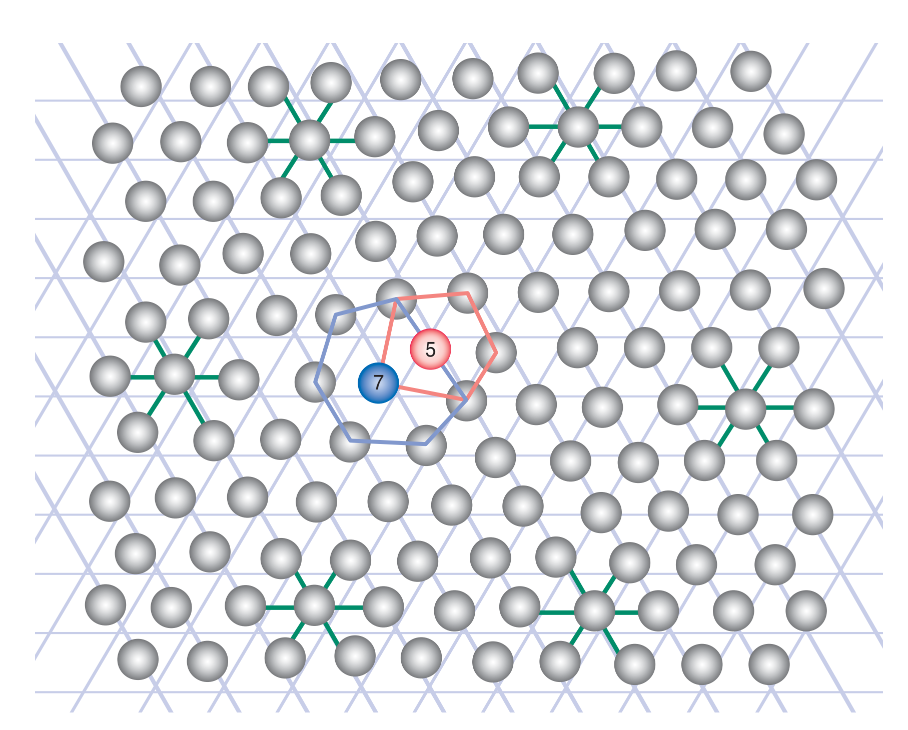
Nelson y Halperin demostraron que, dada una malla cristalina trian-

JORDI IGNES MULLOL

gular (en la que las partículas se sitúan en los vértices de una red de triángulos equiláteros), la aparición de defectos puntuales debidos a la agitación térmica destruye el orden posicional. Estos autores definieron un parámetro de orden hexagonal, o "parámetro de orientación de enlace", que obtenían imaginando un enlace que unía cada átomo con sus seis primeros vecinos en la malla cristalina. Observaron que la orientación de este parámetro de orden se mantiene, aun cuando los defectos puntuales hayan destruido el orden posicional. La simetría hexagonal de este parámetro ha dado nombre a las fases hexáticas.

El empaquetamiento de partículas en dos dimensiones se optimiza mediante una organización con simetría hexagonal (o triangular), en la que cada átomo está rodeado por seis vecinos. Por ejemplo, unas esferas rígidas (unas bolas de cristal o acero) sobre una superficie se empaquetarán óptimamente si adoptan la configuración hexagonal. La misma situación se da, a escalas microscópicas, en suspensiones coloidales confinadas entre placas sólidas, a condición de que el espaciado de las placas sea inferior al doble del diámetro de una partícula. Aunque en este caso suele haber interacciones electrostáticas entre las partículas coloidales, es posible observar tanto cristales cuasibidimensionales con ese orden posicional hexagonal como la transición a una fase con orden orientacional hexático.

La situación se complica, o enriquece, cuando las moléculas que forman el sistema cuasibidimensional no poseen simetría esférica, sino una forma alargada; para describir entonces su disposición en la superficie que las contiene hay que hacer referencia tanto a la posición que ocupan como a la orientación de su eje. Es el caso de las películas de cristales líquidos *calamíticos* (de moléculas alargadas) en fases *esmécticas* (a capas) y el de las monocapas de Langmuir, así llamadas en honor de Irving Langmuir. En ambos casos, la presencia de orden hexático en la distribución de las moléculas está asociada a un orden similar en la orientación del eje molecular: existe un fuerte acoplamiento entre la orientación de las moléculas y el parámetro de orientación de enlace, de forma que la manifestación experimental de uno indica la presencia del otro.



2. UNA DISLOCACION ELEMENTAL destruye el orden posicional en una red hexagonal, pero mantiene el orden orientacional. En ausencia de dislocación, los átomos se sitúan ordenadamente en los puntos definidos por la red hexagonal (orden posicional) rodeados por seis primeros vecinos cuya ubicación relativa al átomo es la misma para todos los átomos (orden orientacional). En el núcleo de la dislocación dos átomos poseen un número anómalo de primeros vecinos: 5 y 7. El resultado es la introducción de desorden posicional en la red cristalina, cuyo efecto se mantiene aun lejos de la dislocación. Por el contrario, el orden orientacional sólo se ve alterado en la vecindad inmediata de la dislocación: unos pocos átomos más allá del núcleo, la orientación de la red permanece, ajena a la dislocación. La proliferación de dislocaciones da origen a fases hexáticas, en las que existe orden orientacional pero no posicional.

JORDI IGNES MULLOL

Las monocapas de Langmuir

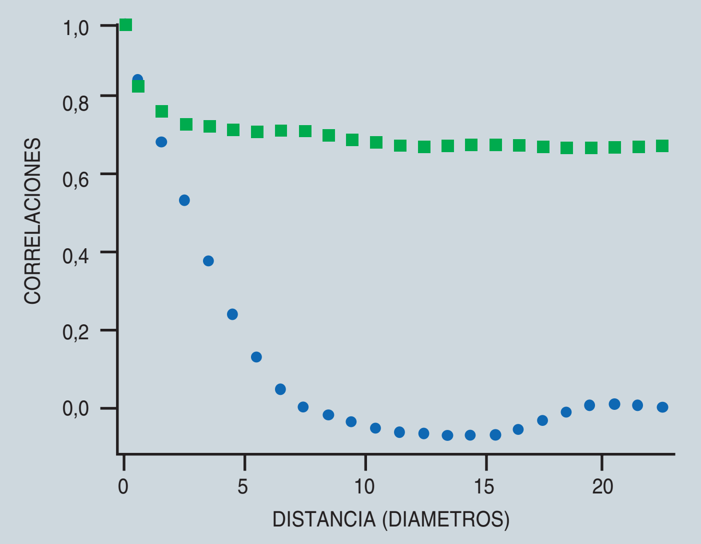
El paradigma de sistema cuasibidimensional con fases hexáticas son las monocapas de Langmuir. Se trata de capas monomoleculares adsorbidas en la superficie de un líquido. Generalmente se forman por la organización de moléculas *anfipáticas* en la superficie libre de agua. Estas moléculas se caracterizan por tener dos zonas con diferentes afinidades por el agua: una parte hidrófila (generalmente con carga o dipolo eléctrico), la *cabeza*, y otra hidrófoba (generalmente una cadena de grupos hidrocarbonados), la *cola*.

Si la cola es suficientemente hidrófoba, la substancia será insoluble en agua. Entonces las moléculas constituyen un sistema cuasibidimensional aislado en la superficie del líquido. Su asimetría hace que "prefieran" permanecer en la superficie del agua: son surfactantes, es decir, contribuyen a reducir el coste energético de poner en contacto medios tan dispares como el agua y el aire. La cabeza se rodea de moléculas de agua y la cola se adentra en el aire.

El ejemplo químicamente más simple de moléculas que forman monocapas de Langmuir lo constituyen los ácidos grasos saturados (sin dobles enlaces) con un número de átomos de carbono entre doce (ácido láurico) y veinticuatro (ácido lignocérico). Otros ejemplos son los fosfolípidos, los alcoholes de cadena larga y, en general, cualquier molécula anfipática suficientemente insoluble dadas las condiciones idóneas de temperatura, *p*H o fuerza iónica del agua.

Al físico, las monocapas de Langmuir le ofrecen un sistema ideal para estudiar el orden y el desorden en dos dimensiones. ¡Difícilmente se

Ordenes y defectos



UN SIMPLE EXPERIMENTO nos ofrece un símil mecánico que ilustra los conceptos de orden orientacional y posicional, así como el distinto efecto que sobre ellos tiene la proliferación de defectos en una red cristalina. Consiste en colocar un número suficiente de esferas rígidas (en la foto, unas 1200 esferas de cristal de 0,5 cm de diámetro) para cubrir el fondo plano de un recipiente, preferiblemente circular. Las esferas se distribuyen de forma espontánea, ayudadas por una ligera agitación del recipiente, en un mosaico de triángulos equiláteros. Lo habitual es que se obtenga una configuración donde coexistan regiones en las que las filas de esferas se orientan de forma diferente, como ocurre en la configuración policristalina de un sólido ideal. Agitando ligeramente, no es difícil conseguir una configuración de "cristal único", en la que las filas de esferas son paralelas en toda la superficie. En estas condiciones, el orden orientacional y posicional son de casi-largo alcance. La presencia de defectos se fuerza en este experimento mediante la introducción, mientras se prepara el sistema, de cilindros metálicos de diámetro mayor que el de las esferas. La fotografía, tomada con un escáner plano sobre el cual se ha colocado el recipiente de cristal, muestra que las filas de esferas mantienen su orientación al alejarse del núcleo de los defectos. Una observación más detallada muestra que, por el contrario, la posición de las esferas en regiones alejadas se ve desplazada respecto a la configuración cristalina por la presencia de los defectos. Es posible cuantificar estas observaciones calculando la correlación de los parámetros de orden posicional y orientacional. Respecto al orden posicional, se empieza por calcular el desplazamiento relativo entre todos los pares de esferas del sistema. Si ese desplazamiento corresponde al que existiría entre puntos de la red cristalina perfecta, el parámetro de orden asociado vale 1, su valor máximo. En caso contrario, su valor es inferior. G_T (*círculos azules*) se obtiene promediando este parámetro de orden posicional para todos los pares de puntos cuya distancia relativa es unas *r* veces el diámetro de una esfera. De forma similar se construye un parámetro de orden orientacional, comparando la orientación de enlace entre pares de esferas, de forma que el valor máximo, 1, corresponda al caso de que los vecinos de ambas esferas estén orientados de forma análoga y compatible con la estructura hexagonal. Promediando este parámetro de orden para todos los pares de puntos cuya distancia relativa es aproximadamente *r* veces el diámetro de una esfera se construye G_6 (*cuadrados verdes*). La representación gráfica de las correlaciones permite observar que la presencia de defectos resulta en una rápida degradación del orden posicional, correspondiente a una caída exponencial de G_T. Sin embargo, la pérdida de orden orientacional es mucho más lenta: G_6 apenas cae un 25 % por debajo de su valor en el cristal a distancias para las cuales el orden posicional se ha desvanecido.

JORDI IGNES MULLOL

puede pensar en un soporte menos rugoso que la superficie del agua! Constituyen un excelente modelo para estudiar procesos relevantes en biofísica y bioquímica de las membranas biológicas, ya que a éstas se las puede considerar como un par de monocapas acopladas débilmente [*véase* "Fluidez de las membranas celulares", por Juan C. Gómez Fernández y Félix M. Goñi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1983]. El químico puede estudiar con las monocapas de Langmuir reacciones químicas en dos dimensiones; le permiten además la modificación y manipulación de las propiedades de la superficie de materiales mediante el depósito de películas monomoleculares bien definidas.

Se suele extender la monocapa sobre una "cubeta de Langmuir", donde para comprimirla o expandirla basta con mover una o más barreras ajustables, que arrastran la monocapa mientras permiten que el agua fluya con libertad bajo las barreras. El sistema se completa con el control de la temperatura y el seguimiento de la tensión superficial (aunque suele hablarse de *presión* superficial, definida como la diferencia entre la tensión superficial de la superficie del líquido puro y la que tiene en presencia de la monocapa). Este seguimiento se lleva a cabo mediante una microbalanza, que detecta la fuerza con que la interfase sujeta una pequeña placa en contacto con ella. Se utiliza una placa de un material que quede completamente humectado por el agua (por ejemplo, una pequeña placa rugosa de platino o incluso un trocito de

papel de filtro). Ningún otro sistema cuasibidimensional brinda una manipulación mecánica tan directa del estado de agregación de las moléculas (análoga a la compresión hidrostática en tres dimensiones) como la que cabe lograr con las monocapas de Langmuir. Además, podemos variar la interacción de las moléculas de la monocapa entre sí y con el volumen de agua que las soporta: basta modificar la estructura de la cabeza o la cola de las moléculas, cambiar el *p*H o alterar la fuerza iónica del agua.

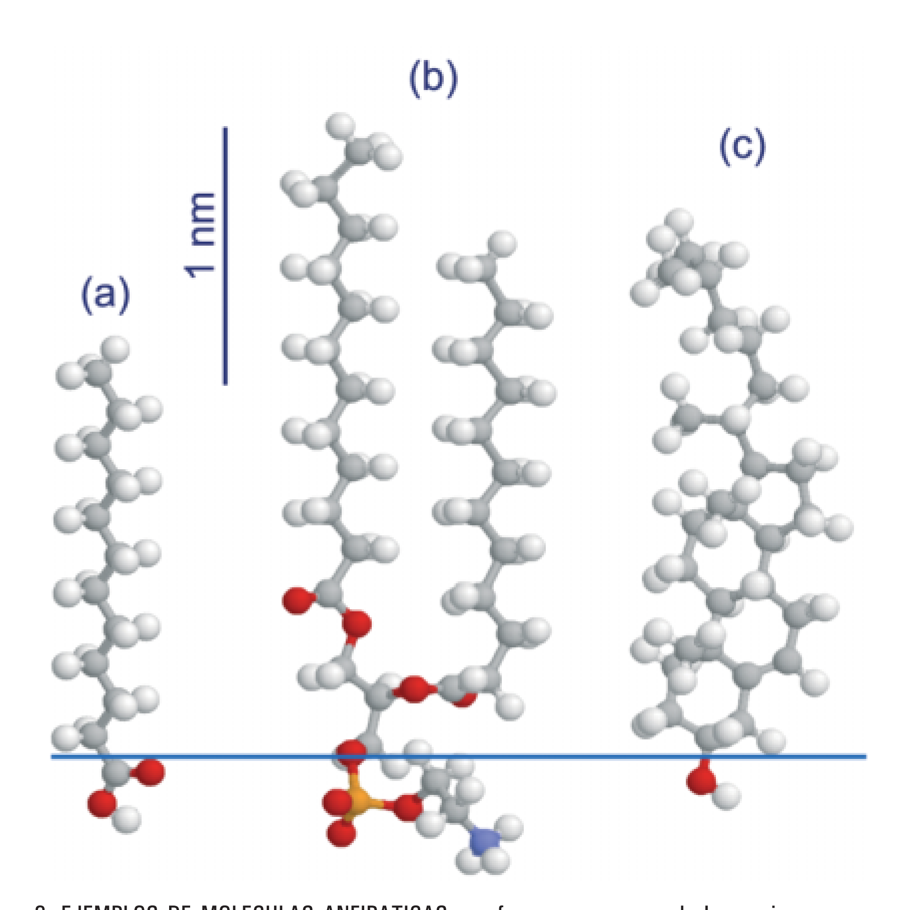
Para la formación de una monocapa de Langmuir es crucial un método adecuado de preparación; de lo contrario, las moléculas, en vez de dispersarse en la superficie, forman agregados tridimensionales [véase *Taller y laboratorio*, por Jearl Walker; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 1984]. De ordinario se disuelve primero la sustancia anfipática en un buen disolvente orgánico volátil (por ejemplo cloroformo o heptano). Pequeñas gotas (de algunos microlitros) de esta disolución se depositan con mucho cuidado sobre agua purísima; la rápida evaporación del disolvente liberará las moléculas en la superficie.

Este método de preparación de monocapas fue ideado a finales del siglo XIX por la alemana Agnes Pockels, quien además introdujo el estudio de la variación, a temperatura constante, de la presión superficial de la monocapa en función del área por molécula en la misma (las "isotermas presión superficial-área molecular"). Llevó a cabo sus experimentos con una cubeta de hojalata en la cocina de su casa. Sus resultados se publicaron en la revista *Nature* por recomendación de Lord Rayleigh, el cual encontró en los experimentos de Pockels inspiración para sus propios trabajos. La concepción moderna de la estructura molecular de las monocapas, en particular la existencia de una orientación preferida de las moléculas, se le debe al químico, físico e ingeniero estadounidense Irving Langmuir, quien descubrió esa característica a principios del siglo XX.

La organización microscópica de las monocapas de Langmuir

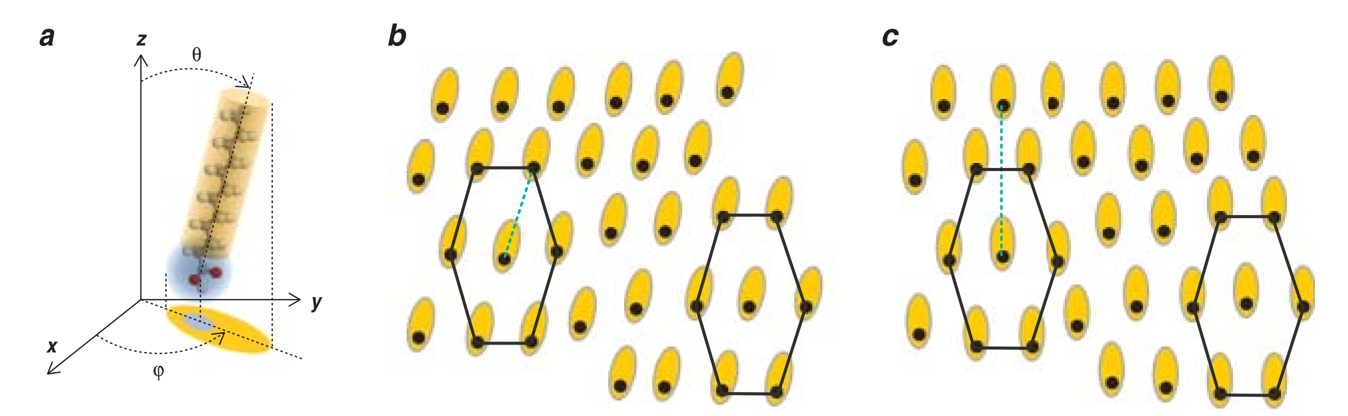
Durante casi un siglo, el estudio de las monocapas de Langmuir se ha limitado casi exclusivamente a la obtención de isotermas presión superficial-área molecular. Su análisis descubre la existencia de diferentes estados de agregación molecular. Así, las monocapas de ácidos grasos se encuentran en fase gaseosa (es decir, en completo desorden y con ausencia de interacciones entre moléculas) para densidades superficiales del orden de centenares de angstroms cuadrados por molécula (1 Å = 10^{-10} m). Por debajo de 100 Å^2/molécula emerge de las isotermas una nueva fase, la fase de "líquido expandido". Cuando el empaquetamiento supera los 30 Å^2/molécula, aparecen fases condensadas (es decir, con interacciones entre las moléculas por las que han de optimizar su distribución) que exhiben una estructura líquido-cristalina.

El orden microscópico de las monocapas de Langmuir no se dilucidó hasta finales del siglo XX. Se produjo entonces, puede decirse, una revolución en este campo, gracias en buena medida a la utilización del sincrotrón de electrones. Esta poderosa fuente de rayos X ha desvelado la ordenación a escala molecular de este y de otros sistemas [*véase* "Luz de sincrotrón" por Josep Capmany, Joan Bordas y



3. EJEMPLOS DE MOLECULAS ANFIPATICAS que forman monocapas de Langmuir en la interfase agua/aire. Las bolas grises representan átomos de carbono, las blancas de hidrógeno, las rojas de oxígeno, las azules de nitrógeno y las amarillas de fósforo. La parte hidrófila, con carga o dipolo eléctricos —la cabeza polar—, se sitúa por debajo de la línea azul. (*a*) El ácido láurico o dodecanoico, un ejemplo de ácido graso saturado, es quizá la más simple de las moléculas anfipáticas que forman monocapas de Langmuir. El reducido tamaño de la cabeza polar, unido a la flexibilidad de la cadena saturada (sin dobles enlaces) de grupos metileno, permite una rica variedad de estados de agregación de estas moléculas en monocapas. (*b*) El fosfolípido dilaurilfosfatidiletanolamina (DLPE) tiene dos colas hidrófobas de ácido láurico que se enlazan, mediante una molécula de glicerol, a una cabeza polar formada por ácido fosfórico y etanolamina. Los fosfolípidos son los constituyentes fundamentales de la membrana citoplasmática. (*c*) El colesterol, molécula fundamental en la membrana de las células eucariotas de los animales, consta de un cuerpo rígido de ciclopentano perhidrofenantreno, con una cadena saturada en el extremo apolar, y un grupo alcohol en el extremo polar que constituye menos del 4 % de la superficie de la molécula.

JORDI IGNES MULLOL



4. LA DISPOSICION DE UNA MOLECULA ANFIPATICA EN UNA MONOCAPA (*a*) ha de precisarse mediante la posición de la cabeza polar sobre el agua y mediante dos ángulos que indiquen la inclinación de las moléculas respecto a la posición vertical (θ, ángulo polar) y la orientación, respecto a un eje de referencia, de su proyección en el plano de la interfase (φ, ángulo azimutal). Aunque la presencia de dislocaciones destruye el orden posicional, hay amplias regiones de la monocapa con moléculas orientadas paralelamente. En (*b*) y (*c*) se muestran dos configuraciones habituales en las fases hexáticas. En una la orientación de las colas es hacia los primeros vecinos y en la otra hacia los segundos vecinos.



Ramón Pascual; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2000]. Ahora sabemos que las fases condensadas de moléculas simples, como los ácidos grasos, son fases hexáticas: la disposición espacial de las moléculas sobre la monocapa es intrínsecamente desordenada, pero con un orden orientacional de largo o casi-largo alcance (como en el modelo KTHNY). Dos ángulos describen la orientación de la cola: el polar, que hace referencia a la inclinación respecto a la vertical (la normal a la superficie), y el ángulo azimutal, el formado por la proyección de la cola sobre la interfase y una dirección de referencia.

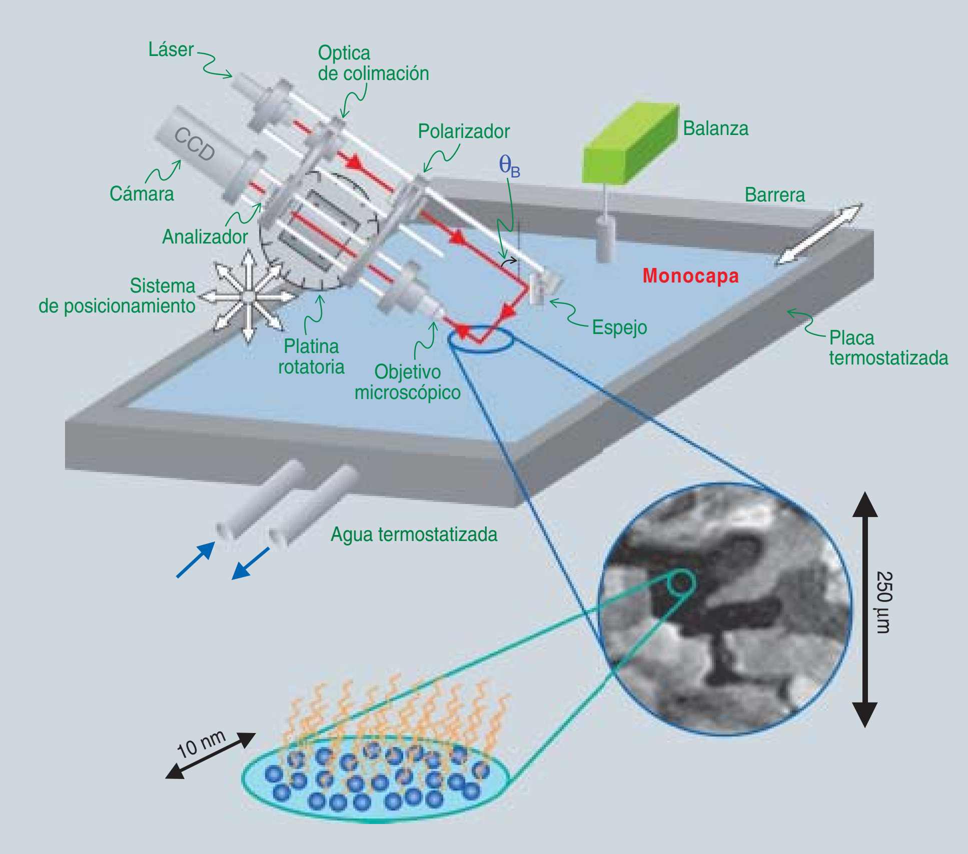
En las fases condensadas las moléculas se organizan de modo que su empaquetamiento se optimiza. Para monocapas con débil interacción electrostática, como las de los ácidos grasos o los fosfolípidos, todas las moléculas presentan en la configuración de equilibrio, caracterizada por una presión superficial uniforme, el mismo ángulo de inclinación con respecto a la superficie (un mismo ángulo polar). Esta condición deja todavía un grado de libertad para el valor del ángulo azimutal, parámetro adicional de orden íntimamente ligado al parámetro orientacional de enlace del modelo KTHNY. Así, en determinadas condiciones de presión superficial y temperatura, las moléculas de la monocapa están inclinadas hacia sus primeros o segundos vecinos, que describen los vértices de un hexágono, regular o deformado, dentro del cual se encuentra sólo la molécula en cuestión. La organización molecular y las simetrías a escala nanométrica de la monocapa se desvelan mediante la difracción de rayos X a ángulos bajos. Esta técnica se basa en el análisis de la radiación reflejada en la superficie del agua sobre la que se ha depositado una monocapa. Cuando la incidencia es casi rasante con la superficie, la radiación penetra sólo unos nanómetros en el volumen del líquido; recoge así información sobre la distribución de materia a escalas atómicas en una capa sólo un poco más gruesa que la monocapa.

Las técnicas microscópicas con luz visible, sensibles a la orientación molecular (microscopía de fluorescencia polarizante y microscopía de ángulo de Brewster, entre otras técnicas), revelan monocapas cuyas moléculas se organizan como un mosaico de regiones donde las orientaciones de las moléculas son paralelas entre sí. La superficie de esas regiones puede llegar a unas décimas de milímetro cuadrado; constan, pues, de miles de millones de moléculas. Las regiones contiguas del mosaico se distinguen por sus valores diferentes del ángulo de orientación azimutal.

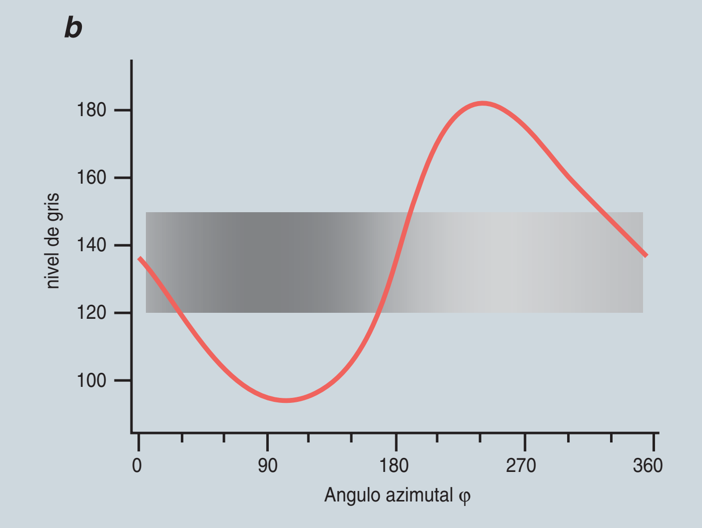
Tenga en cuenta el lector que los dos tipos de técnicas de análisis de monocapas aquí expuestas, la difracción de rayos X y la microscopía con luz visible, exploran escalas de longitud muy distintas; se complementan para la comprensión y control de la estructura de las monocapas en su aplicación industrial y en su uso biomimético. Un ejemplo importante de este tipo de aplicaciones lo constituye la preparación de una monocapa para su depósito sobre una superficie sólida, con el fin de modificar las propiedades de ésta (la resistencia a la corrosión, la reducción de fricción, etcétera). Otro ejemplo es la creación de mosaicos de moléculas con unas afinidades químicas particulares que les valgan para actuar como sensores químicos o biológicos.

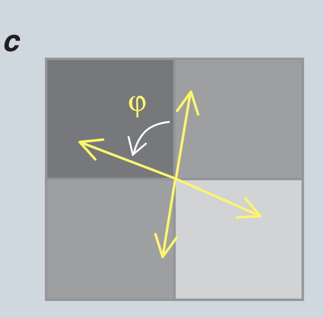
Las denominadas capas de Langmuir-Blodgett se obtienen haciendo que el sustrato a recubrir se deslice a través de la monocapa formada en la superficie de la cubeta de Langmuir. Según sea la afinidad del sustrato, bien la región polar hidrófila, bien la apolar hidrófoba de las moléculas de la monocapa se adherirá a la superficie sólida; así se alterarán las propiedades de ésta según sean las de la monocapa. El proceso de ingeniería con que se fabrica un determinado dispositivo mediante esta técnica se basa en la utilización de moléculas anfipáticas simples, a las cuales se une químicamente el radical que va a determinar las propiedades del dispositivo. Esta técnica contrasta con la fabricación por autoensamblaje [*véase* "Materiales autoensamblantes", por George M. Whitesides; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 1995], en la que no se ejerce un control directo sobre el proceso de agregación de las moléculas que

La cubeta de Langmuir termostatizada

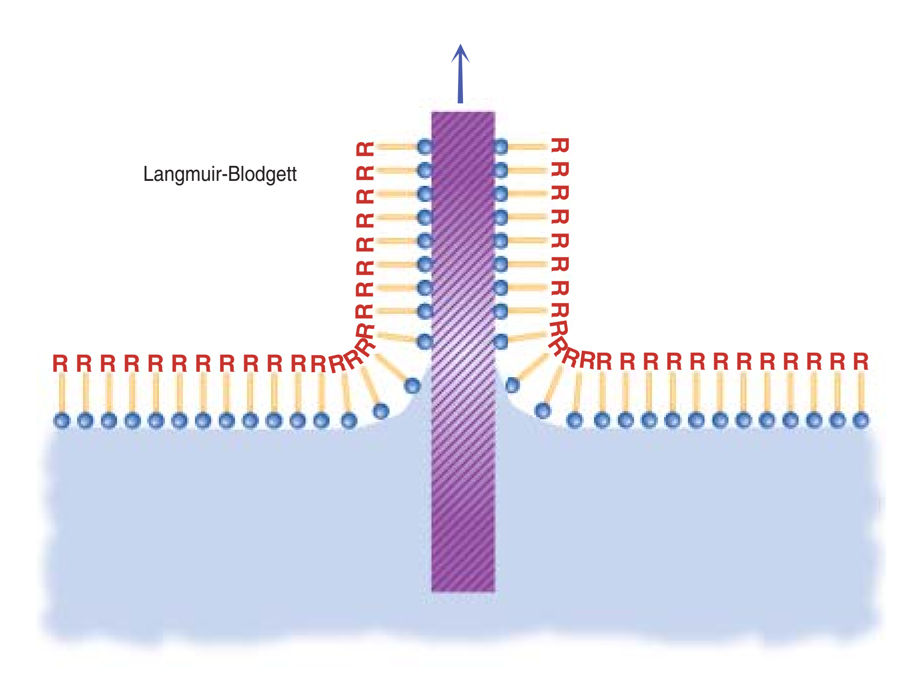


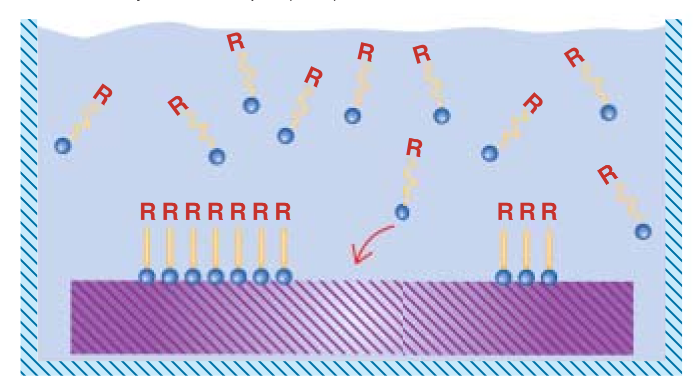
LA MONOCAPA DE LANGMUIR se prepara depositando moléculas anfipáticas, a partir de una disolución en un disolvente orgánico apropiado, sobre una superficie de agua purísima situada en un recipiente de algunos milímetros de profundidad, que suele ser de PTFE (teflón), por su naturaleza inerte. El área disponible para la monocapa está limitada por las paredes de la cubeta y por una o dos barreras móviles. Una balanza electrónica mide la tensión superficial o fuerza con la que la interfase tira de una placa en contacto con ella. La tensión superficial depende de la temperatura y del área por molécula en la monocapa. Un ordenador controla el movimiento de las barreras para que la tensión superficial mantenga un valor determinado. El control termodinámico de la monocapa suele complementarse con su observación mediante alguna técnica microscópica que revele detalles de su estructura. En la figura se ilustra el microscopio de ángulo Brewster (BAM). La luz que incide sobre la superficie del agua formando con ella el ángulo de Brewster, se refleja como luz polarizada perpendicularmente al plano de incidencia (el que contiene el rayo incidente, el reflejado y la normal a la interfase). El ángulo de Brewster viene dado por los índices de refracción a ambos lados de la interfase; cuando esta separa el aire y el agua, vale 53 grados con respecto a la normal de la interfase. El BAM (inventado alrededor de 1990) hace incidir sobre la interfase, con ángulo Brewster, luz polarizada linealmente en el plano de incidencia. En ausencia de monocapa, la intensidad reflejada será nula, puesto que toda la luz penetrará en el agua. La presencia de una monocapa, que altera localmente el índice de refracción, origina una pequeña fracción de luz reflejada, que se detecta con una videocámara CCD. El índice de refracción de un medio dieléctrico varía con la longitud de onda (*color*) de la luz incidente, resultando en un valor de θ_B que varía cerca de medio grado entre la luz roja y la violeta. La alta sensibilidad del procedimiento obliga a usar luz monocromática para que el valor de θ_B esté bien definido; por ello la fuente de iluminación es un láser. Además, es importante que la luz llegue a la superficie en haces paralelos, o colimados; se consigue mediante una combinación de lentes. Un espejo donde el rayo incidente se refleja antes de llegar a la superficie permite colocar la cámara en el mismo brazo que sujeta el láser; así se simplifica el diseño y la utilización del aparato. La intensidad de luz que llega a la cámara está relacionada con la densidad de empaquetamiento y con la inclinación de las moléculas. El uso de un segundo polarizador (el analizador) mejora el contraste entre zonas con distinta orientación azimutal. En la ventana circular se muestra la imagen obtenida mediante BAM de una monocapa de ácido behénico (docosanoico) en una fase condensada. Muestra un mosaico de dominios en los que la intensidad de la luz reflejada es uniforme: miles de millones de moléculas se orientan de forma paralela en ellos. Conociendo las propiedades ópticas y la longitud de las moléculas que forman la monocapa (caracterizables mediante técnicas complementarias) es posible cuantificar la relación entre la reflectividad y la dirección del eje de las moléculas. El análisis de imágenes digitalizadas en 256 niveles de gris permite estudiar cambios en la orientación molecular. Contrastando niveles de gris cabe comparar la orientación de las moléculas en distintas regiones de la monocapa (*b*). Así, en las imágenes donde la luz reflejada se dirige hacia el observador, las regiones más oscuras corresponden a moléculas orientadas hacia su izquierda, mientras que las regiones más claras corresponden a moléculas orientadas hacia su derecha (*c*).





JORDI IGNES MULLOL





5. LAS MOLECULAS ANFIPATICAS de una capa de Langmuir sirven de portadoras para transferir un grupo funcional *R*, enlazado con ellas químicamente, a una superficie sólida, cuyas propiedades físicas (su fricción o su humectabilidad) cambiará, así como para fabricar dispositivos (por ejemplo, sensores capaces de reconocer determinadas moléculas). En la técnica de Langmuir-Blodgett, al deslizar un sustrato hidrófilo a través de una monocapa de Langmuir que lleva el radical *R* se consigue la adsorción de la monocapa por el sustrato, que adquiere las propiedades del radical. Se tiene también la técnica del autoensamblaje de monocapas (SAM, sus siglas en inglés) a partir de las moléculas anfipáticas en disolución. En este caso se controla la química de las moléculas, su afinidad por el sustrato y las propiedades de la disolución, pero no existe control directo sobre el proceso de agregación de las moléculas sobre el sustrato.

JORDI IGNES MULLOL

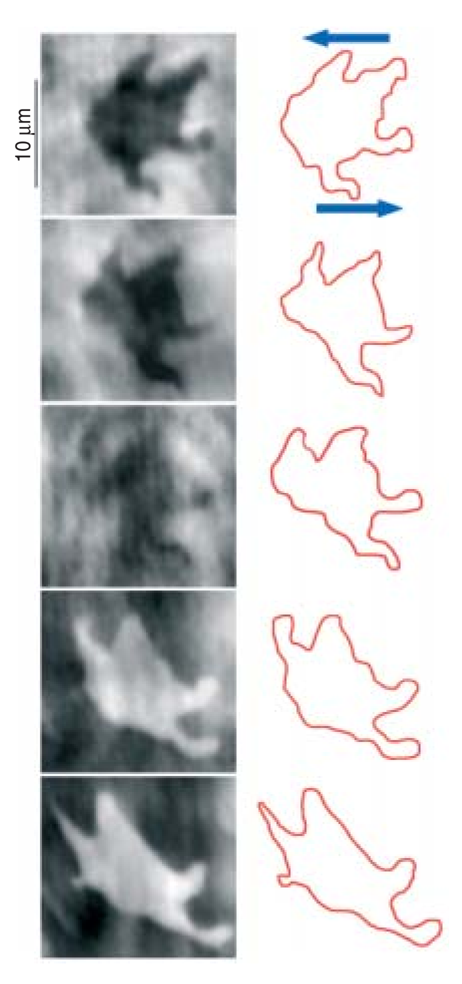
formarán el dispositivo: se basa en el control de la afinidad entre la molécula portadora (a la que se ha enlazado químicamente el grupo funcional que nos interesa) y la superficie a recubrir, dejando que el proceso de agregación de las moléculas en disolución sobre el sustrato sólido ocurra espontáneamente.

Flujos y monocapas

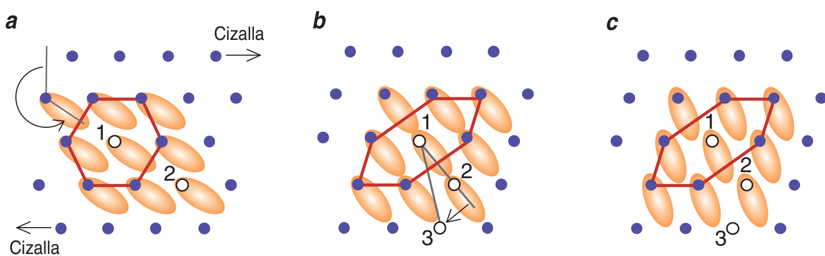
El lector habrá notado que la mayoría de los ejemplos de sistemas aquí expuestos pertenecen al ámbito de la materia *blanda*. Dicho nombre se refiere a sistemas con una descripción estructural a escala mesoscópica, de tamaño intermedio entre la descripción a escala molecular del sistema y la que corresponde a propiedades macroscópicas, como los fenómenos de flujo o las propiedades ópticas. La característica fundamental de la materia blanda es la interacción entre sus componentes moleculares, débil pero determinante de las propiedades macroscópicas gracias a los fenómenos cooperativos que originan estructuras supramoleculares. En el caso de las monocapas de Langmuir de moléculas simples, como las aquí descritas, la interacción de las moléculas se debe a las fuerzas de Van der Waals, que originan una repulsión a cortas distancias y una débil atracción a distancias mayores. Por su naturaleza lábil, los agregados supramoleculares de las monocapas resultan muy sensibles a las perturbaciones externas (por ejemplo, a flujos, radiaciones o iluminaciones); de ello depende que la fabricación de un dispositivo tenga éxito.

El estudio del efecto que un flujo ejerce sobre las estructuras de las monocapas constituye un ámbito particular en la investigación de éstas. Saber cómo las moléculas de una monocapa hexática cambian su orientación debido a la perturbación externa no sólo tiene un interés académico; ayuda en la preparación de capas de Langmuir-Blodgett, puesto que el paso de la placa sólida a través de la monocapa crea un flujo en la misma. Además, el comportamiento de las monocapas bajo un flujo afecta a la estabilidad de espumas y emulsiones y guarda relación con procesos de difusión y transporte de moléculas en las membranas biológicas.

El estudio del efecto de aplicar un flujo a fases condensadas de monocapas simples comenzó hace poco. Se ha descubierto que, dependiendo de sutiles detalles en su estructura microscópica, como la relación entre la inclinación de las moléculas anfipáticas y el parámetro orientacional de enlace (la orientación con respecto a primeros o a segundos vecinos), el flujo lo mismo puede reducir el alcance del orden orientacional (es decir, fragmentar el mosaico de la monocapa) o aumentarlo. Se ha puesto de manifiesto gracias a la observación mediante microscopía de ángulo Brewster de monocapas sometidas a fenómenos de flujo. Las monocapas responden a la aplicación de esfuerzos como un medio viscoelástico cuasibidimensional, en el cual la energía mecánica introducida se dispersa en parte como calor, por la fricción que origina el desplazamiento relativo de las moléculas vecinas, y en parte se almacena de modo reversible como energía elástica.



6. LAS MOLECULAS de una monocapa de Langmuir hexática no se acoplan directamente a un flujo externo, en este caso de cizalla (como marcan las flechas azules): siguen las deformaciones de la red subyacente. Estas imágenes se tomaron con un microscopio de ángulo Brewster a intervalos de segundo y medio.



7. EL EFECTO DEL FLUJO DE CIZALLA en el ejemplo de la figura 6 se explica con este sencillo modelo: la molécula en 1 pasará de estar orientada en el sentido 1 a 2 a estarlo en el sentido 1 a 3.

Las mismas investigaciones han demostrado que la existencia de un orden hexático resulta determinante en el comportamiento de las monocapas. Se ha observado que, si bien éstas se comportan cualitativamente bajo flujos de forma similar a otros sistemas formados por partículas alargadas (como los cristales líquidos nemáticos o los agregados poliméricos), su dinámica difiere cuantitativamente.

Entenderemos el porqué si tomamos en cuenta que en este caso el flujo deforma continuamente la red hexática definida por la posición de las moléculas, en vez de actuar de manera directa sobre la orientación de las moléculas de la monocapa. Las imágenes revelan los cambios en la orientación de las moléculas, pero esos cambios resultan del acoplamiento entre la orientación de las moléculas y el orden orientacional de enlace de la red, continuamente deformada por el flujo.

En el ejemplo de la figura 6, se aplica un flujo de cizalla simple a una monocapa condensada de ácido docosanoico; es decir, un extremo de la monocapa se desplaza horizontalmente hacia la izquierda y el extremo opuesto se mueve en sentido contrario. El flujo de cizalla deforma la región en el centro de cada imagen de la figura (sus contornos se muestran en la columna de la derecha). Al mismo tiempo, su reflectividad varía continuamente: indica una precesión continua de las moléculas anfipáticas, que están orientadas hacia la izquierda en las dos imágenes superiores y hacia la derecha en las dos inferiores.

Dado que las moléculas que rodean la región de interés experimentan una precesión análoga, de derecha a izquierda en este caso, llega un momento (*imagen central*) en la que sus dos reflectividades se confunden y se pierde el contraste en las imágenes. Un análisis cuantitativo de la evolución de la reflectividad de la monocapa revela que la dinámica es distinta a la que se tendría si el flujo se acoplara directamente a la orientación de las moléculas. Lo explica un sencillo modelo geométrico, que comprende una sola hipótesis: que la orientación de las moléculas respecto a la red hexagonal formada localmente por sus posiciones se mantiene en todo momento. El flujo de cizalla variará la posición relativa entre las moléculas que, en el ejemplo, se orientan hacia segundos vecinos. La orientación de cada molécula evolucionará siguiendo el desplazamiento del segundo vecino hacia el que se orienta. Debido a dicha deformación, moléculas que eran segundos vecinos (*1 y 2 en la figura 7*) pasarán finalmente a ser primeros vecinos, lo cual viola la simetría característica de la fase condensada que constituye la monocapa. La respuesta del sistema, observada experimentalmente, es un cambio súbito y colectivo en la orientación de las moléculas de la región considerada, presumiblemente para adoptar una configuración más próxima a la de equilibrio (la molécula en 1 pasará de estar orientada en el sentido 1 a 2 a estarlo en el sentido 1 a 3).



El autor

Jordi Ignés Mullol investiga en el departamento de química física de la Universidad de Barcelona. Es doctor en ciencias físicas por las universidades de Pittsburgh y Barcelona. Ha investigado en las universidades de Pittsburgh y Tulane, y en la École Normale Supérieure de Lyon.

Bibliografía complementaria

SURPRISES IN THEORETICAL PHYSICS. Rudolf Peierls. Princeton University Press, 1979.

LES CRISTAUX LIQUIDES. Patrick Oswald y Pawel Pieranski. Gordon and Breach Science Publishers, 2000.

SHEAR-INDUCED MOLECULAR PRECESSION IN A HEXATIC LANGMUIR MONOLAYER. Jordi Ignés-Mullol y Daniel K. Schwartz, en *Nature* vol. 410, págs. 348-351; 2001.

EL ORIGEN DE LAS CONSTE

BRADLEY E. SCHAEFER

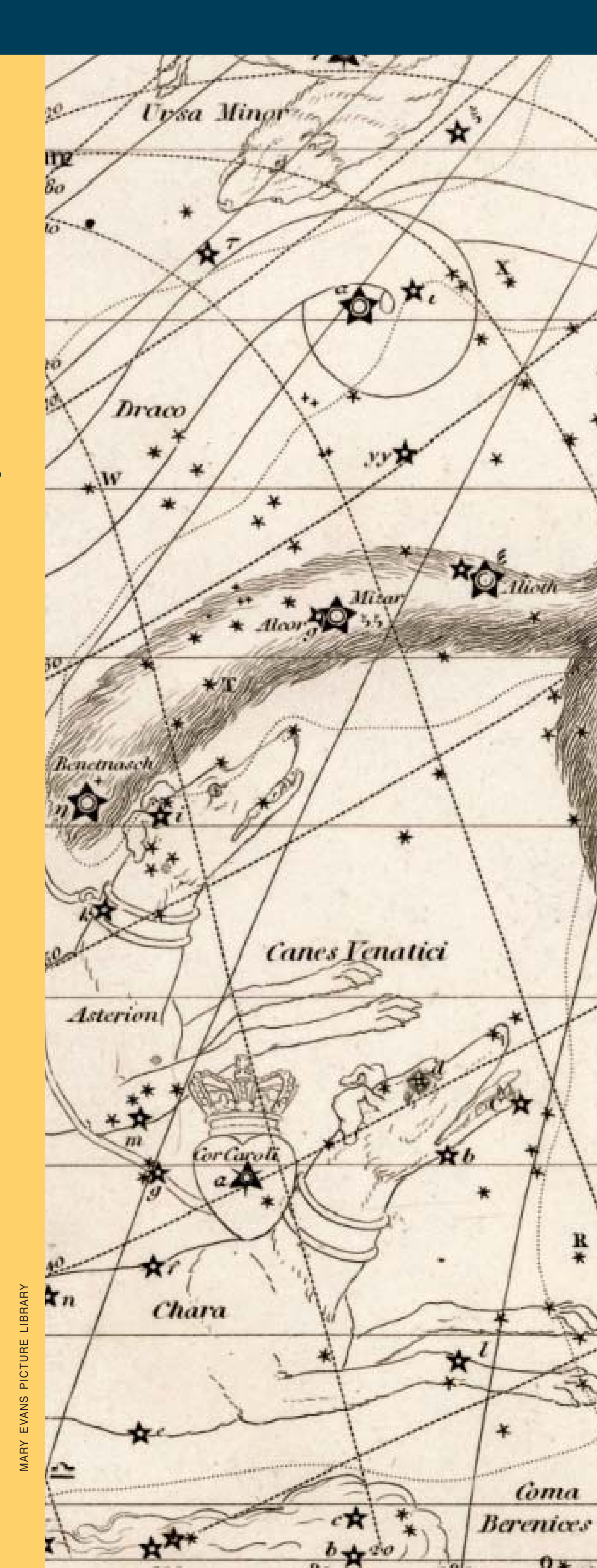
ASTRONOMÍA Y ARQUEOLOGÍA, COORDINADAS, HAN DESCIFRADO EL ORIGEN DE LAS FIGURAS DE ESTRELLAS Y ESTABLECIDO SU USO POR DISTINTAS CULTURAS A TRAVÉS DE LOS TIEMPOS

De labios de mi abuelo aprendí a identificar la constelación de la Osa Mayor. Luego, me divertía yo con unos viejos prismáticos buscando otras constelaciones en el cielo de Colorado. Incluso inventé algunas. No me preocupaban por entonces ni la edad ni el origen. Ignoraba que las constelaciones encierran un fascinante problema científico.

Cuando la Unión Astronómica Internacional estableció oficialmente en 1922 las 88 constelaciones, extrajo la mayoría de ellas del *Almagesto* (según el nombre árabe) de Ptolomeo, escrito hacia el 150 d.C., que describía tradiciones comunes entre los griegos, popularizadas antes en el muy difundido poema *Phaenomena* de Arato, del 275 a.C. El único libro que ha llegado hasta nosotros del astrónomo Hiparco, *El comentario*, de 147 a.C., nos revela que el poema de Arato es, en parte extensa, copia de una obra del mismo título de Eudoxo (366 a.C.), desaparecida. Estos escritos recogían las primeras descripciones de los cielos griegos; en ellas las constelaciones aparecen plenamente "dibujadas". Pero, ¿de dónde procedían las constelaciones griegas?

Cazadores paleolíticos

Para seguir la pista de la historia de las constelaciones, hemos de remontarnos a tiempos muy anteriores a los griegos. Las constelaciones aparecen en todas las culturas del mundo. Milenios antes de que la contaminación lumínica ensombreciese el cielo nocturno, las gentes levantaban la mirada para contemplar el movimiento incesante de los astros. Los humanos tienen un talento natural para reconocer estructuras; no sorprende que fuera un anhelo universal, desde tiempos remotos, juntar estrellas vecinas en grupos. El mejor punto para empezar es el que eligió mi abuelo, la Osa Mayor, o *Ursa Major*.



LACIONES GRIEGAS



1. LA OSA MAYOR tal como fue pintada por Alexander Jamieson en su atlas celeste de 1822. A las tres estrellas de la cola se las suele llamar "los tres cazadores".

Estas siete estrellas, de brillo medio, son conocidas también con otros nombres (el Gran Cazo, el Carro, el Arado, etcétera). Arato llama al grupo Osa y Carro, indistintamente. El nombre de carro apareció después de la invención de la rueda (en el cuarto milenio antes de Cristo), pero el nombre de osa es, sin duda, mucho más antiguo. Los primeros grupos humanos de Eurasia conocían el mito y las estrellas de la Osa Mayor. Según la versión más común, las cuatro estrellas del cuenco del cazo eran la osa, incesantemente cazada por las tres estrellas del mango, que representaban a tres cazadores. Griegos, vascos, hebreos y muchas tribus de Siberia combinaban de manera muy parecida esas estrellas y ese mito. Sorprendentemente, las mismas estrellas y relatos afloran por toda América del Norte. Con algunas variaciones, muchas tribus del Nuevo Mundo —cheroquis, algonquinos, zunios, tlinguitos e iroqueses— comparten la interpretación del oso perseguido por tres cazadores.

¿Qué explicación dar a la estrecha coincidencia entre las tradiciones del Viejo y del Nuevo Mundo? No es probable que la Osa sea una ocurrencia a la que se haya llegado por separado, porque el grupo de estrellas no se parece a un oso. Podemos también excluir la posibilidad de una contaminación por parte de misioneros y exploradores, porque el saber popular de los indios se recopiló a menudo muy pronto y los relatos no reproducen exactamente la versión griega traída por los colonos europeos. De acuerdo con la interpretación más lógica del fenómeno, los primerísimos colonizadores del Nuevo Mundo llevaron consigo la esencia del mito a través del estrecho de Bering.

Hace unos 14.000 años, cazadores y recolectores del paleolítico emigraron por una lengua de tierra, entre Siberia y América, que se formó durante la última glaciación, cuando el nivel del mar estaba bajo. Su cultura pervivió en sus descendientes, que poblaron el Nuevo Mundo. Es fácil imaginarse una secuencia de abuelos que, desde la Siberia paleolítica hasta las montañas y llanuras del Nuevo Mundo y, con el tiempo, hasta el Colorado moderno, fueron contando la historia de la Osa del firmamento.

El origen real de la constelación de la Osa pudo haber sido muy anterior a esa migración. Las pinturas rupestres europeas, los utensilios y los conjuntos de cráneos de osos de las cuevas europeas datan de hace más de 30.000 años. Sugieren algún tipo de culto al oso. La constelación pudo haberse originado como una representación popular de un icono chamánico. Fuera como fuese, la Osa Mayor constituye, con toda probabilidad, una de las invenciones más antiguas del hombre.

Sacerdotes asirios

El primer testimonio conocido y directo de las constelaciones se halla escrito en piedra y en tablillas de arcilla, desenterradas en Mesopotamia (en el actual Iraq). El texto “Plegaria a los dioses de la noche”, de la antigua Babilonia (alrededor del 1700 a.C.), menciona cuatro constelaciones, entre ellas el Carro, más tres estrellas aisladas y las Pléyades. Inscripciones en piedra anteriores a 1300 a.C. incluyen iconos que en siglos posteriores se referirían a constelaciones, pero sin que aparezcan en un contexto celeste; todavía no se los había proyectado al cielo. Aunque la falta de pruebas hace difícil extraer una conclusión segura, parece que los mesopotámicos anteriores a 1300 a.C. sólo habían configurado unas pocas constelaciones.

Después de esa época, hitos y sellos cilíndricos empiezan a representar dibujos de iconos agrupados de constelaciones junto a símbolos conocidos del Sol, la Luna y los planetas. Estas estrechas asociaciones nos aseguran que los dibujos se refieren a constelaciones. A partir de alrededor de 1100 a.C. las tablillas cuneiformes enumeran más de 30 nombres de constelaciones de tres franjas del firmamento. Una serie de tres tablillas, denominada MUL.APIN, contiene largas listas de observaciones de las posiciones y movimientos de casi todas las agrupaciones mesopotámicas de estrellas. MUL.APIN se copió repetidas veces, con ligeras variaciones, al parecer como libro de texto o almanaque; nos quedan ejemplares desde el 687 a.C. hasta el siglo tercero antes de Cristo.

Por fortuna para quienes estudiamos la astronomía antigua, podemos datar el conocimiento tradicional de las constelaciones gracias a la precesión del firmamento. La precesión es el desplazamiento de las estrellas respecto a las coordenadas definidas por el polo norte y los equinoccios (*véase el recuadro* “Precesión: estrellas móviles”). Podemos leer la fecha como si se tratara de un reloj, cuya lenta manecilla de las horas serían las estrellas que se desplazan sobre la esfera, las coordenadas celestes. MUL.APIN da las posiciones relativas de las estrellas del firmamento; podemos traducirlas a fechas aproximadas. Por ejemplo, según las tablillas, el equinoccio de primavera cae al este de la constelación que ahora llamamos Aries (Carnero). Este dato nos lleva a finales del segundo milenio a.C. Muchas de las observaciones dependen también de la latitud del observador; un análisis completo puede, pues, indicar fecha y latitud del observador.

Hermann Hunger, de la Universidad de Viena, y David Pingree, de la Universidad Brown, ya fallecido, analizaron varias listas de MUL.APIN, en parte comparándolas con una relación posterior de fechas de aparición de estrellas aportada por Ptolomeo. Dedujeron que se confeccionó hacia el 1000 a.C. y a una latitud de 36 grados. El observador —u observadores— debía de hallarse, por lo tanto, en Asiria (la parte septentrional de Mesopotamia). Dado que MUL.APIN menciona casi todas las constelaciones mesopotámicas, parece que en su mayoría se crearon en un intervalo bastante breve: entre 1300 y 1000 a.C.

Por mi parte, identifiqué, en MUL.APIN, 114 observaciones de las que cabe también deducir la fecha y la latitud. Ninguna revela una fecha y una latitud tan precisas que resulten de alguna utilidad, pero la combinación estadística de las 114 observaciones lleva a valores bastante precisos. Creo que las informaciones de MUL.APIN corresponden al 1100 a.C. (con un margen de error de 80 años) y una latitud de 33 grados norte (con un margen de error de 1,5 grados). Mis resultados concuerdan con los de Hunger y Pingree: apuntan a observadores asirios y sugieren un período de formación inferior a dos siglos.

Otro análisis de los datos de las constelaciones puede determinar el tiempo y lugar de origen de las constelaciones más meridionales que cabe ver desde el hemisferio

norte. Este cálculo se funda en el supuesto siguiente: las estrellas residentes demasiado al sur para ser visibles desde un lugar septentrional de latitud media formarían un vacío, más o menos circular, centrado en el polo sur. El centro del agujero, la deducida posición del polo, revelaría la fecha; el radio del agujero, la latitud de los "diseñadores" de las constelaciones. Valiéndome de estas nociones elementales, calculé que las seis constelaciones meridionales que definen el borde del agujero se idearon hacia principios del primer milenio a.C. en una latitud de unos 33 grados.

Las pruebas arqueológicas, las fechas y latitudes deducidas de MUL.APIN y las derivadas de las seis constelaciones más meridionales concuerdan: la mayoría de las constelaciones mesopotámicas y de los datos de observación corresponden a una latitud de entre 33 a 36 grados para años entre 1300 y 1000 a.C., y fueron obra de asirios.

En MUL.APIN las constelaciones forman una combinación curiosa. Algunas son dioses, otras representan animales y el resto describe aperos de labranza. El texto formula muchos presagios basados en los grupos de estrellas, que le sirven también para confeccionar un calendario, vital para cualquier economía agrícola. Augurios, dioses y calendarios eran incumbencia del clero, una pista convincente de que las constelaciones fueron concebidas por sacerdotes.

Sabios griegos

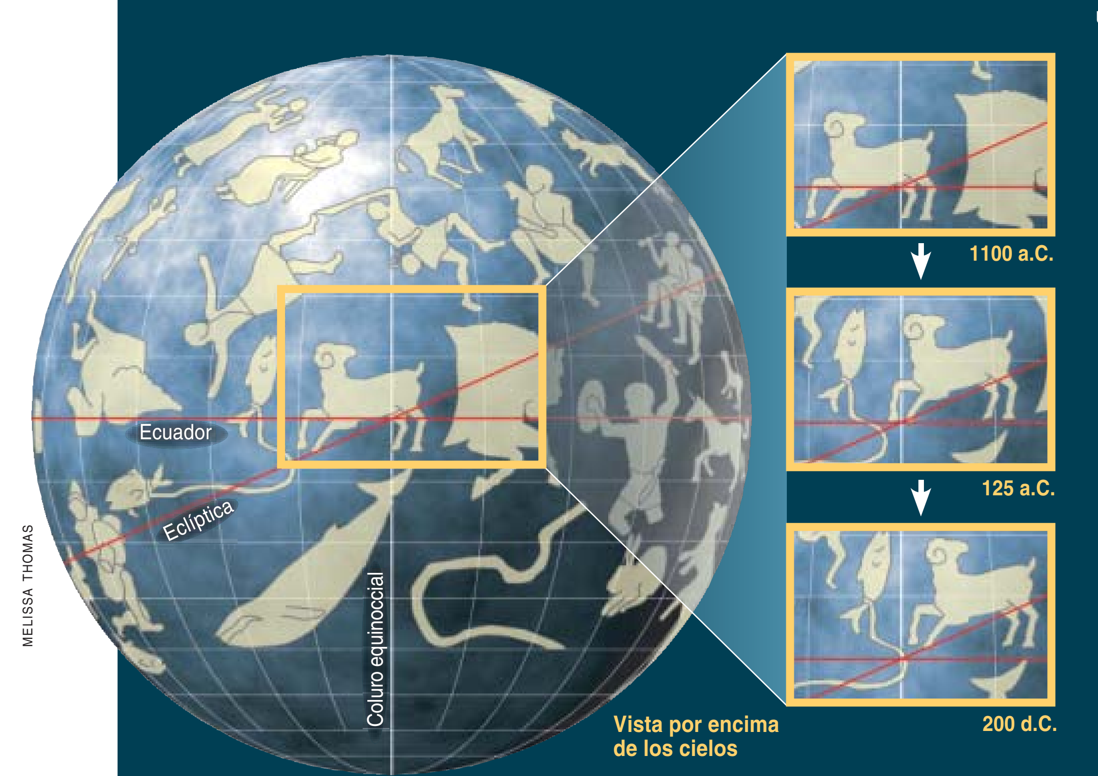
Las agrupaciones mesopotámicas reaparecen en las clásicas constelaciones griegas. Por ejemplo, las estrellas Capricornio y Géminis griegas eran conocidas por los asirios con nombres parecidos: Cabra-Pez y los Grandes Gemelos. Un total de 20 constelaciones son copias directas. Otras 10 tienen las mismas estrellas, aunque nombre diferente. Por ejemplo, el

PRECESION: estrellas móviles

Datar las constelaciones requiere conocer el proceso de la precesión, que define un lento bamboleo del polo terrestre debido a las fuerzas de mareas ejercidas por la atracción lunar. En virtud de la precesión, las posiciones de las estrellas en el firmamento varían a lo largo de los siglos. Una peonza se tambalea de manera análoga a medida que se va parando. Por ese bamboleo, el polo norte de la Tierra describe en el cielo un círculo amplio; en concordancia, la estrella polar (o estrella del norte), la estrella más cercana al polo, cambia de tanto en tanto (*véase el diagrama arriba a la derecha*). Otra consecuencia es que las posiciones de las estrellas se deslizan a lo largo de la eclíptica (la trayectoria del Sol en el cielo) a razón de casi un grado (doble del diámetro angular de la Luna) cada 72 años.

Las posiciones de los astros se miden respecto a líneas imaginarias (ahora, círculos máximos) en el cielo. Estas líneas son análogas a las del globo terráqueo, con el ecuador celeste equivalente al ecuador terrestre y los coluros celestes correspondiendo a meridianos o líneas de longitud de referencia, como el primer meridiano de Greenwich. El equinoccio de primavera es la posición del Sol cuando cruza el ecuador celeste hacia el norte (donde se cortan las líneas rojas). El cambio precesional desplaza el equinoccio con respecto a las estrellas del fondo, sustituyendo unas constelaciones zodiacales por otras, aproximadamente cada dos milenios. Por el tiempo de la Grecia clásica, el equinoccio se hallaba en Aries, luego en Piscis y más recientemente en Acuario (de ahí "la era de Acuario"). Hiparco descubrió la precesión hacia 128 a.C., cuando advirtió que los equinoccios habían cambiado de sitio con respecto a lo indicado en las fuentes antiguas, asombrosa proeza intelectual que lo consagra como uno de los mayores astrónomos de la Antigüedad.

Vega
(Estrella polar hace 14.000 años)
Polaris
(Estrella polar actual)
Polo norte de la eclíptica
Precesión
Rotación diaria

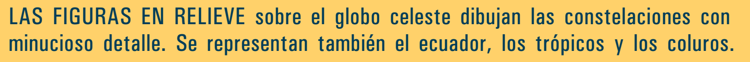


LAS POSICIONES DE LAS CONSTELACIONES se desplazan con el tiempo. Proceden lentas con respecto de los coluros y del ecuador. Proporcionan así una manera de establecer fechas. Un análisis del Carnero (Aries) en el globo celeste del Atlas Farnesio indica que la estatua original se esculpió hacia 125 a.C., cuando el borde del asta del carnero estaba justo más allá del coluro.

MELISSA THOMAS

ATLAS FARNESIO

La representación más antigua que ha llegado hasta nosotros de las constelaciones griegas aparece en una estatua del siglo II a.C., el Atlas Farnesio. Los historiadores del arte opinan que se trata de una copia de un original griego. La talla de mármol, ahora en Nápoles, representa al dios Atlas cargando sobre sus espaldas la esfera celeste. Mi análisis pormenorizado de las posiciones de las constelaciones sobre la esfera muestra que las figuras se hallan situadas con una precisión mejor que dos grados para una fecha en torno al 125 a.C., con una imprecisión de 55 años. Esta exactitud indica que los datos originales eran sistemáticos y precisos, como los de un catálogo de estrellas. El catálogo de Hiparco constituía, por entonces, el único que existía. Cuando se comparan las constelaciones representadas en la esfera con las descripciones verbales del *Comentario* de Hiparco y con las de otras obras, sólo concuerdan con las de Hiparco. Es obvio que algún otro astrónomo pudo haber confeccionado en esa época un catálogo distinto, pero no existe ni el menor indicio de ello. Muy probablemente, la fuente es Hiparco.



LAS FIGURAS EN RELIEVE sobre el globo celeste dibujan las constelaciones con minucioso detalle. Se representan también el ecuador, los trópicos y los coluros.

Jornalero y la Golondrina asirias pasaron a llamarse Aries y Piscis.

La constelación Triángulo ofrece un buen ejemplo de cómo adoptaron los griegos las estrellas mesopotámicas. En MUL.APIN las estrellas del Triángulo se llamaban "el Arado" (nombre que también se aplicó a la Osa). En Mesopotamia y Egipto la geometría era bien conocida por los estudiosos, pero tan sólo como una herramienta práctica. Tales (585 a.C.) llevó la geometría de Egipto a Grecia; aquí se transformó. Dejó de ser un conjunto de reglas prácticas para constituirse en sistema lógico, organizado, de gran belleza y generalidad, que culminó en el libro capital de Euclides, *Los elementos* (300 a.C.). Sólo tras esa transformación se le pudo ocurrir a alguien conmemorar en los cielos al triángulo, fundamento de la geometría. El Triángulo es, pues, con seguridad la nueva denominación griega de un grupo de estrellas mesopotámicas; este cambio tuvo lugar entre la época de Tales y la de Eudoxo, es decir, entre el siglo VI y el IV a.C.

No se sabe si los griegos adoptaron muchas constelaciones en la época en que se introdujo el Triángulo, pero la escasa información al respecto sugiere que no. Las fuentes escritas griegas más antiguas —los poemas épicos de Homero (que se cree son del siglo VIII a.C.) y el almanaque agrícola de Hesíodo (datado también hacia el siglo VIII)— mencionan dos constelaciones prominentes (Orión y la Osa Mayor), dos grupos de estrellas (las Pléyades y las Híades) y dos estrellas (Sirio y Arturo). Pero nada más. El resto de fuentes griegas anteriores a 500 a.C. nada cuenta sobre las estrellas. Así pues, los griegos tenían las figuras de estrellas más destacadas antes del 500 a.C., aunque no muchas más.

La primera descripción completa de los cielos griegos procede del libro de Eudoxo, del siglo IV a.C., que sólo conocemos por amplias citas de Arato e Hiparco. Eudoxo incluye declaraciones del tenor siguiente: "Esa cabeza [del Dragón] gira cerca de donde se confunden los límites del orto y del ocaso", lo que quiere decir que las estrellas en la cabeza del Dragón están a una distancia del polo tal, que rozan el horizonte septentrional. Tal observación sólo es verdadera en una latitud determinada, que varía con la fecha. Pero la correspondiente restricción de la latitud y la época resulta bien imprecisa, apenas si ayuda. Eudoxo escribe también: "Cuando el Escorpión se alza por el este, Orión corre por el confín occidental"; en otras palabras, Escorpión y Orión aparecen simultáneamente en horizontes opuestos. Este segundo enunciado impone también una restricción difusa a la latitud y la fecha.

Se pueden combinar ambas restricciones para deducir una fecha y una latitud únicas de las observaciones, pero con una precisión todavía demasiado pobre para ser útil. A fin de obviar el problema, identifiqué 172 frases de Eudoxo que dependen de la latitud y la época. Las restricciones combinadas de todas las observaciones dieron como resultado final una incertidumbre de 0,9 grados (unos cien kilómetros) en la latitud y de 80 años en el tiempo. Por lo tanto, el saber popular de Eudoxo parece provenir en su integridad de un tiempo y lugar determinado: 1130 a.C. a 36 grados, Asiria.

El tiempo y lugar deducidos encajan con los fijados para las observaciones del MUL.APIN. He advertido que MUL.APIN y Eudoxo comparten una cantidad considerable de información. Me lleva a concluir que los datos utilizados por ambos provenían de una base de datos primigenia creada por observadores asirios

MUSEO ARQUEOLOGICO NACIONAL, NAPOLES, ITALIA/BRIDGEMAN ART LIBRARY (*izquierda*); GERRY PICUS, CORTESIA DEL OBSERVATORIO GRIFFITH (*derecha*)

alrededor de 1100 a.C. Dado que las dos tradiciones que nos han llegado contienen la mayoría de las constelaciones antiguas (algunas con otro nombre), deduzco que el conjunto de las constelaciones estaba concluido, en líneas generales, alrededor de 1100 a.C.

Por consiguiente, parece razonable deducir que, en un período posterior a esa fecha y anterior al libro de Eudoxo (366 a.C.), los griegos recibieron esos grupos mesopotámicos de estrellas. La falta de testimonios sobre las constelaciones griegas (si exceptuamos la Osa y Orión, mencionadas por Homero) antes de 500 a.C. sugiere que gran parte de la transferencia aludida tuvo lugar con posterioridad a esa fecha. Sabemos, por indicios textuales, que el zodiaco babilónico llegó a Grecia hacia el 400 a.C. (El zodiaco era el camino que recorre el Sol en su giro alrededor de la Tierra; cuando el Sol se movía por el zodiaco, pasaba frente a 12 constelaciones, que presentaban figuras humanas y de animales). Estos conocimientos pudieron propagarse de Mesopotamia a Grecia por muchos caminos, pero no sabemos lo suficiente para quedarnos con uno.

A pesar de la estrecha dependencia de las agrupaciones mesopotámicas de estrellas, el sistema griego de constelaciones incluye 19 figuras estelares que no hundían sus raíces en el este ni en parte alguna que podamos indicar. Además, la índole de estas constelaciones es genuinamente helénica. Así, la figura del héroe griego por antonomasia, Hércules, rodeado en el cielo por otras constelaciones que representan a criaturas derrotadas por el gran guerrero (entre ellas Leo y Dragón). Aparece también Ofiuco, llevando la Serpiente, y el Delfín, imagen apropiada para un pueblo marinero como el griego. Seis de estas constelaciones son cuadros de la mitología griega relativos al rescate de Andrómeda por Perseo. Lo más probable es que las "nuevas" configuraciones de estrellas fueran inventadas por los propios griegos.

2. MOJON DE MESOPOTAMIA, algo posterior a 1300 a.C., con figuras de constelaciones.

MUL.APIN, serie de tablillas cuneiformes con observaciones de 1100 a.C., da la lista de las constelaciones mesopotámicas.

Científicos modernos

Con el paso del tiempo fue cambiando la forma en que los griegos utilizaban las constelaciones. Los dibujos empezaron por describir relatos de héroes y animales legendarios. Después, se convirtieron en herramientas de navegantes y base de calendarios. Más tarde, el zodiaco vino a ser un sistema de coordenadas para la medición de las posiciones planetarias, dentro de la astrología aprendida de los babilonios.

Los escritos de Hiparco marcan el paso hacia el estudio científico de las estrellas. Al comienzo de su carrera acometió minuciosas comparaciones cuantitativas de las constelaciones del libro de Eudoxo con lo que se veía en el cielo. Encontró numerosas diferencias. En 135 a.C. descubrió una nova (una estrella que explota). Este hallazgo le inspiró la elaboración de un catálogo completo de estrellas —que no ha llegado hasta nosotros— para que se pudieran identificar las futuras novas. Con un catálogo cuantitativo y los antiguos datos de los griegos en la mano, dio con el cambio de posición de las estrellas debido a la precesión, un hallazgo decisivo. El estudio de las constelaciones había empezado a ser fundamentalmente científico, en el sentido moderno.

Los orígenes de las constelaciones griegas a partir de un centón de fuentes superpuestas sobre el cielo se alejan tanto en el pasado, que las pruebas son incompletas. No queda más remedio que reconocer que en nuestra reconstrucción habrá lagunas significativas, que algunos puntos no pasan de meras especulaciones razonables. Pero el esquema básico está claro y nos muestra cómo se ha transmitido el conocimiento a través del tiempo y del espacio. Las constelaciones nos ofrecen un modo singular —distinto del fundado en los estilos de cerámica— de penetrar en una cultura, un modo que tiene en cuenta aspectos intelectuales de la sociedad prehistórica, difíciles de captar en las típicas fuentes arqueológicas. Además, la secuencia de usos que las sociedades asignan a las constelaciones traza la vía por la que una faceta de la astronomía se transformó en ciencia moderna. La secuencia pasa de lo religioso a lo popular, a lo útil y, por último, a lo científico, con una tendencia constante hacia una espiritualidad decreciente y una creciente cuantificación. Pero hoy como ayer, las historias de nuestros abuelos siguen ligando generaciones y culturas.

El autor

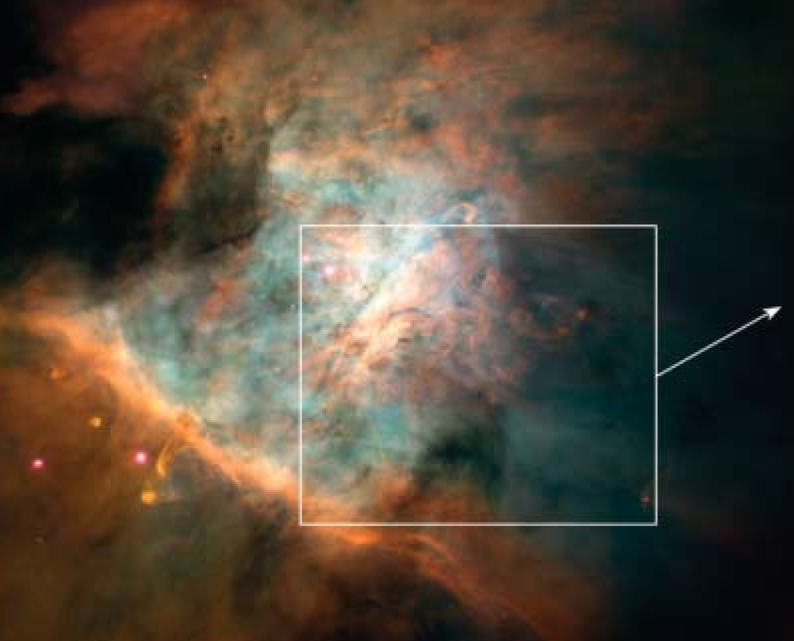
Bradley E. Schaefer se licenció y doctoró en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En la actualidad enseña en el departamento de física y astronomía de la Universidad del estado de Louisiana. Forma parte del equipo editorial del *Journal for the History of Astronomy* y de *Archeoastronomy*.

Bibliografía complementaria

ASIATIC PARALLELS IN NORTH AMERICAN STARS LORE: URSA MAJOR. W. B. Gibbon en *Journal of American Folklore*, vol. 77, págs. 236-250; 1964.

LOS MISTERIOS MITRAICOS. David Ulansey en *Investigación y Ciencia*, n.º 161, págs. 76-81; febrero, 1990.

ASTRAL SCIENCES IN MESOPOTAMIA. H. Hunger y D. Pingree. Brill, 1999.

Sistemas planetarios extrasolares

Gracias a la observación de estos mundos lejanos vamos conociendo mejor la formación y evolución de los sistemas planetarios

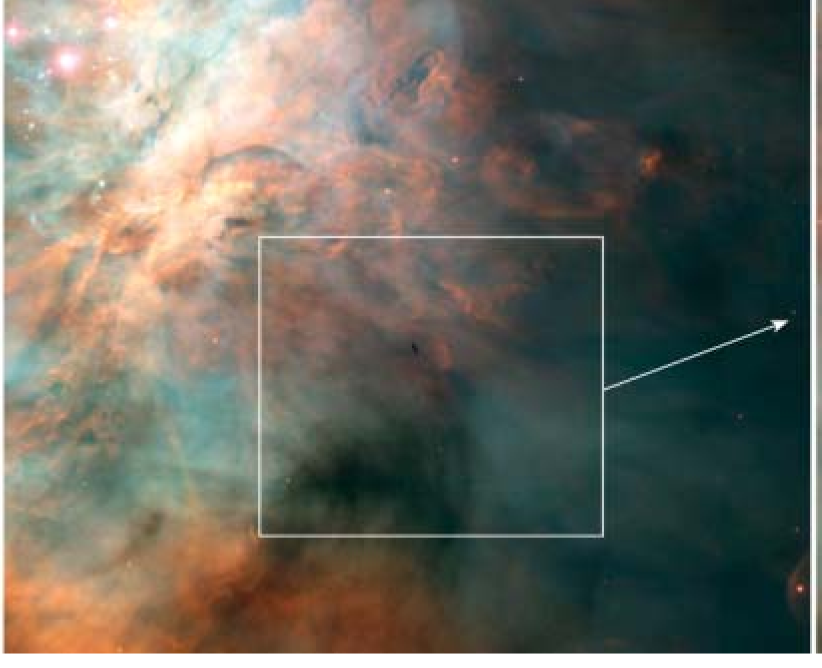
Gregory P. Laughlin

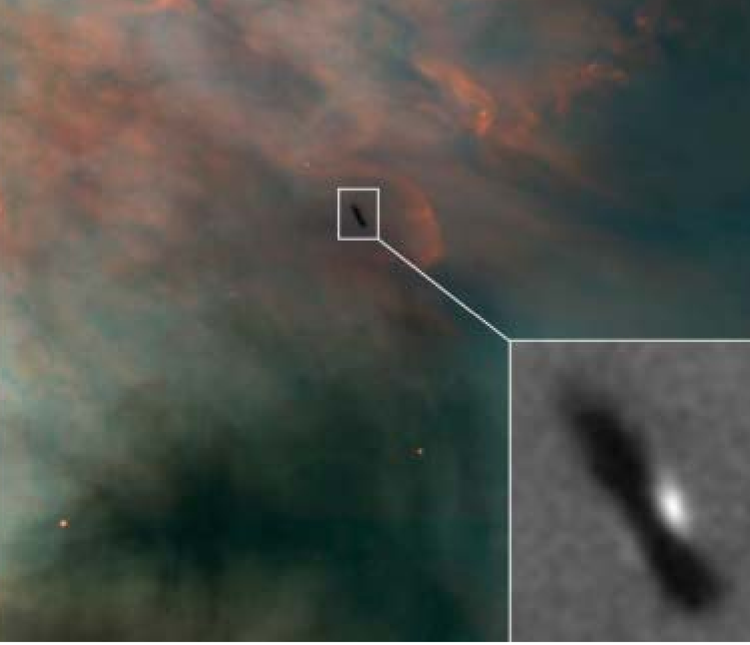
Gracias a la observación Christiaan Huygens realizó la primera búsqueda de planetas extrasolares de que se tenga noticia. Era en el siglo XVII. Las tres centurias siguientes asistieron a falsas alarmas, esperanzas frustradas y detecciones nulas. En 1988 aparecieron los primeros despuntes de progreso. El equipo dirigido por Gordon A. H. Walker, de la Universidad de la Columbia Británica, anunció la presencia de compañeros invisibles de masa planetaria en órbita alrededor de diversas estrellas cercanas. Se mostraron cautos. Considerarlos planetas constituía sólo una de las posibles interpretaciones de los datos. En consecuencia, muy pocos se percataron del anuncio.

Al año siguiente, David W. Latham, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y cuatro miembros de su equipo informaron de la posible órbita de un planeta en torno a la oscura estrella HD 114762. Puesto que la masa del objeto de Latham decuplicaba, al menos, la masa de Júpiter, muchos pensaron que se trataba de una enana marrón o de una estrella de masa muy pequeña. De nuevo, no se reparó en la noticia.

En 1992, Alexander Wolsczan, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y Dale A. Frail, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, emplearon un método muy preciso de análisis temporal para descubrir dos planetas pequeños en órbita alrededor de un púlsar. Según parece, esos mundos tan peculiares se formaron en el disco de escombros radiactivos creado en la explosión de supernova que dio lugar al púlsar. Quizá por la singularidad del marco, pocos creyeron que se hubiese encontrado un sistema planetario análogo a nuestro sistema solar. Sin embargo, el hallazgo fue el primer indicio de que la formación planetaria constituía un proceso común, compatible con circunstancias dispares.

En 1995, Michel Mayor y Didier Queloz, del Observatorio de Ginebra, sorprendieron al mundo con el descubrimiento de un planeta alrededor de 51 Pegasi, una estrella cercana no muy diferente del Sol. El planeta, según sus cálculos, tenía unas 150 veces la masa de la Tierra y completaba una órbita en sólo 4,2 días.





1. LA NEBULOSA DE ORION, a 1500 años-luz de la Tierra, es un semillero de estrellas, con sus planetas. Estas imágenes ópticas, cuyo aumento crece de izquierda a derecha, muestran su situación en la constelación de Orión (*izquierda*), sus algodonosas nubes de gas y polvo (*centro izquierda y centro derecha*) y uno de los muchos discos protoestelares que contiene (*derecha*). En la imagen de mayor resolución, el disco oscuro, 17 veces mayor que el sistema solar, oculta casi por completo la estrella brillante del centro (*recuadro interior*).

CORTESIA DEL OBSERVATORIO SUR EUROPEO (*a*); C. ROBERT O'DELL Y SHUI KWAN WONG, *Universidad de Rice*/NASA (*b y c*); M. McCAUGHREAN, INSTITUTO ASTRONOMICO MAX PLANCK, O'DELL Y NASA (*d*)/*American Scientist*

Cuando se hizo público el hallazgo, en el marco de un congreso científico que se celebraba en Italia, la incredulidad fue la reacción más extendida. Un planeta con un período orbital tan corto debe permanecer muy cerca de su estrella, a un escaso 5 por ciento de la distancia entre la Tierra y el Sol. Por esas fechas, suponíase que los planetas de gran masa se encontraban mucho más lejos. Y, ¿cómo era posible que ese mundo recién descubierto (al que se bautizó "51 Peg b") sobreviviese en una órbita tan disparatada?

Apenas transcurridos unos días, otros astrónomos confirmaban las observaciones de Mayor y Queloz y varios equipos de astrofísicos acometían diversos análisis de ese "júpiter caliente", mediante modelos informáticos. Para sorpresa de muchos, los cálculos mostraron que un planeta como 51 Peg b podía soportar la radiación intensa de su estrella; tal vez perdería sólo una fracción despreciable de su masa durante los miles de millones de años que el planeta y su estrella perdurarían.

No se dispone de imágenes del planeta en cuestión. Aun así, no cuesta imaginar su aspecto. Su cara diurna es 400 veces más brillante que las dunas de los desiertos de arena de la Tierra en un día de verano. La propia cara nocturna emite un resplandor rojo. Para mirar la cara iluminada del planeta se necesitaría una careta de soldador. Una vez amortiguado así el brillo, percibiríamos nubes arremolinadas de sulfuro de sodio. Las capas exteriores de la atmósfera deben de consistir en una mezcla tóxica de hidrógeno, helio, vapor de agua, metano, monóxido de carbono, cianuro, acetileno, sulfuro de hidrógeno, hollín y otros compuestos tóxicos.

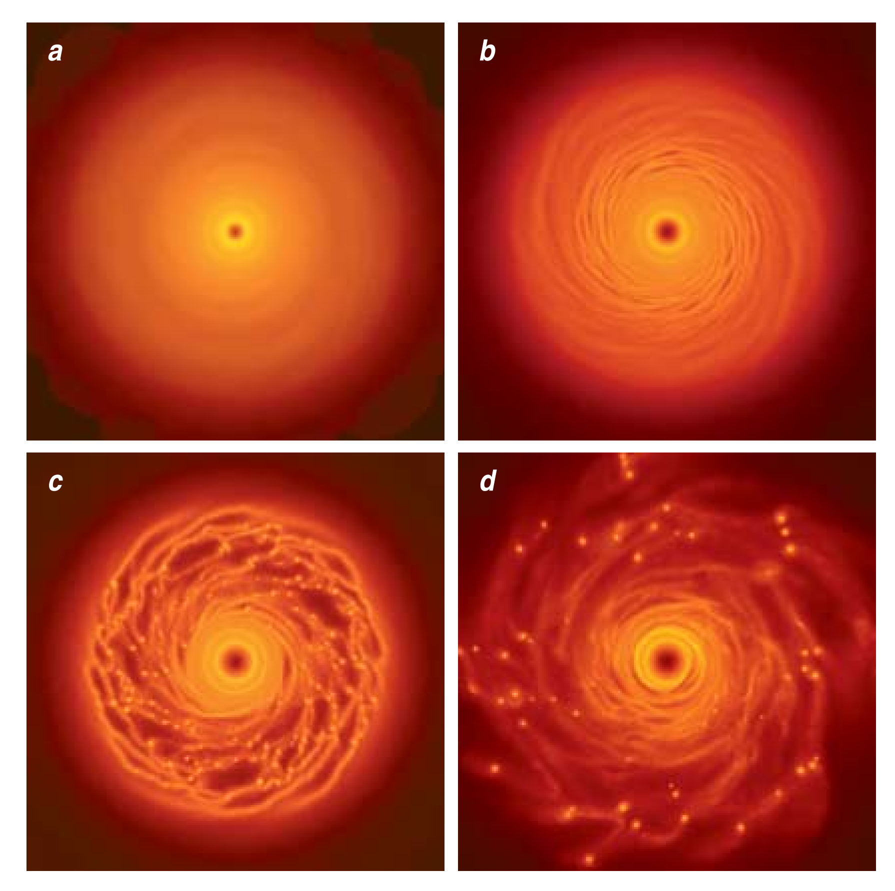
El hallazgo de un mundo tan extraño, que nadie había predicho, abría un nuevo y revolucionario campo de la astronomía: el estudio de los sistemas planetarios foráneos. En la actualidad se han identificado cerca de 200 mundos extrasolares que pueblan sistemas planetarios. Asombra la diversidad de sus propiedades. La cifra misma indica que la formación de planetas debe de ser común. Las características de estos mundos y de sus órbitas nos guían en el conocimiento de la génesis y evolución de los sistemas planetarios.

Nacimiento de las estrellas

Si se mira al cielo en una noche oscura, se verá sin dificultad la Vía Láctea: nuestra propia galaxia, con forma de disco, contemplada desde su interior. Entre los numerosos puntos de luz se encuentran gigantescas nubes moleculares, masas enormes de hidrógeno molecular y helio entreverado con un polvo un poco más fino que las partículas del humo de un cigarrillo. Estos monstruos oscuros, congregados en los brazos espirales de la Vía Láctea, son gélidos (con temperaturas de unos 10 kelvin); mas, si pudiéramos comprimir 10 millones de años en un minuto, los veríamos humear y hervir.

Dentro de los núcleos de estas nubes, el gas denso y frío se halla siempre al borde del colapso gravitatorio. El desastre lo evita la presencia de partículas dotadas de carga, los iones y electrones libres, cuyo número decuplica con creces al de átomos neutros y moléculas. Estas partículas cargadas se alinean con las líneas de campo magnético. El movimiento de las cargas arrastra a las líneas de campo, y viceversa. Sin embargo, las líneas se resisten a la compresión y distorsión. Tienden tenazmente a recuperar su forma inicial. Este fenómeno impide que los iones y los electrones se sumen al colapso gravitatorio de la nube. Y al rebotar tales partículas cargadas en las partículas neutras circundantes, contrarrestan el desplome gravitatorio.

Durante la mayor parte del tiempo las fuerzas dispersoras hinchan las nubes moleculares, que suelen romperse por fuerzas de marea antes de que su propio peso las comprima. En ocasiones, sin embargo, no predomina el efecto de iones y electrones. El gas neutro los deja atrás y se reagru-



2. UNA DE LAS TEORIAS que se proponen explicar la formación de los planetas en los discos protoestelares se basa en la generación de concentraciones de materia por inestabilidades gravitatorias. Las simulaciones numéricas de este proceso muestran la evolución de una distribución regular del material (*a*): primero aparecen hebras (*b*), que dan lugar a varias concentraciones de masa (*c* y *d*).

IMAGENES DE W.K.M. RICE *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 346, n.º 3, págs. 36-40; 2003, CORTESIA DE BLACKWELL PUBLISHING/*American Scientist*

pa en una masa concentrada. A medida que este proceso gana impulso, los iones y los campos magnéticos van perdiendo su capacidad de dilatar la nube. Porciones imponentes de la nube se derrumban sobre sí mismas. Quien observase desde el centro del proceso vería desaparecer las estrellas circundantes. El lugar quedaría en la mayor oscuridad y el peor frío.

Con el colapso, el gas concentrado del centro forma una estrella. Y comienza a desarrollarse otro fenómeno: el material que cae hacia dentro desde lejos no aterriza en la protoestrella central, sino que la evita y crea un plato arremolinado de gas y polvo. Ese movimiento giratorio se debe a que la nube molecular original almacenaba una pequeña componente de rotación aleatoria. Igual que ocurre con el patinador que cierra los brazos, la masa gira más deprisa cuanto más dentro se encuentre.

La idea de que el Sol y sus planetas nacieron de un disco de gas y polvo de ese estilo data del siglo XVIII. El naturalista francés Georges Louis Leclerc, conde de Buffon, propuso que un cuerpo celeste y el Sol se aproximaron mucho; el encuentro arrojó la materia que más tarde se condensó en planetas. Esta teoría explica que todos los planetas orbiten en la misma dirección. Immanuel Kant conjeturó que los planetas surgieron de una nube primordial de gas. Elaboró más esta hipótesis, durante la última década del siglo XVIII, Pierre-Simon Laplace, quien pensaba que el disco se contraía a medida que se enfriaba, dejando tras de sí una sucesión de anillos cuya fragmentación constituyó los planetas. La cosmogonía del siglo XVIII, redactada en un lenguaje que hoy parece pintoresco, no es del todo correcta, pero asombra cuánto se acerca a la realidad. Nuestras simulaciones por computadora la refrendan en líneas generales y añaden muchos de los detalles que le faltaban.

La fábrica de planetas

Una de las teorías sobre la formación, a partir de discos protoestelares de gas y polvo, de gigantes gaseosos semejantes a Júpiter la atribuye a la inestabilidad gravitatoria. En pocas palabras: a medida que la densidad del disco protoestelar aumenta, la autogravedad engendra grumos aquí y allá. Al mismo tiempo, la presión del gas en cada una de esas concentraciones de masa contrarresta parcialmente la tendencia al colapso. Además, la rotación diferencial del disco (el material cerca de la estrella orbita más deprisa) tiende a separar los fragmentos recién formados. La rotación diferencial, pues, actúa como una influencia estabilizadora a gran escala que se opone a la nucleación gravitatoria de los planetas. El quid de la cuestión estriba en averiguar quién se impondrá: la gravedad, con lo que se formarán cuerpos de masa joviana, o la rotación y la presión, que dejarían un disco sin planetas.

Aunque a la intuición le resulte satisfactoria, el grueso de las observaciones y de las pruebas teóricas parece ir en contra de la hipótesis de la inestabilidad gravitatoria. Según las simulaciones por ordenador, para que se formen los fragmentos y sobrevivan constituidos en planetas el disco tiene que enfriarse muy deprisa. (El enfriamiento rápido impide que las concentraciones recientes de masa experimenten su propia presión y favorece así la fragmentación gravitatoria.) Quizás aún más importante: los experimentos numéricos indican que antes de que un disco alcance la masa suficiente para mantenerse cohesionado por su propia gravedad, se generan unas ondas que empujan al gas a extramuros de las regiones donde el material propende a la fragmentación en planetas.

Si los planetas gigantes no se condensan en esos discos directamente por la inestabilidad gravitatoria, ¿cómo nacen? La conjetura más sólida nos la ofrece la teoría de la acreción nuclear. Presupone que los planetas comienzan siendo pequeños y crecen acumulando polvo. Nos sirve la imagen del polvo doméstico. Este no se acumula en una capa gruesa y uniforme. Las

corrientes aleatorias de viento remueven el polvo y forman pelusas. Cada pelusa —hecha de pelo, caspa, polvo e innumerables hebras de procedencia indeterminada— tiene una estructura bastante esponjosa y ocupa un volumen grande para su masa. Por eso resulta eficiente a la hora de recoger más materia: una vez se ha formado no les cuesta crecer. Un proceso similar debe de actuar en los discos protoestelares.

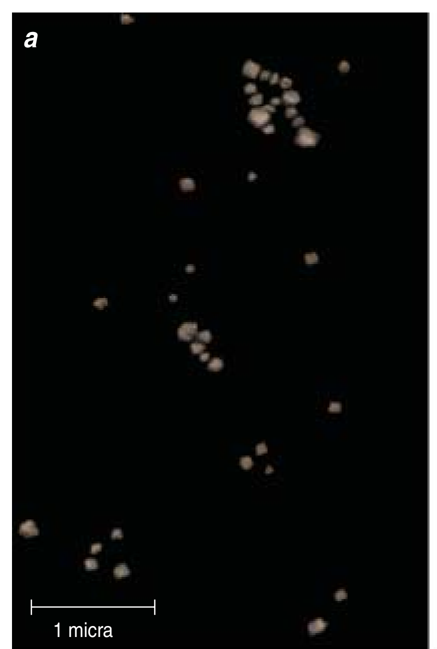
Aun así, cuesta comprender el crecimiento inicial de tales objetos de polvo y hielo. El problema reside en las acumulaciones pulverulentas, que experimentarían un viento frontal, debido al gas del disco; provocaría su caída en espiral y se vaporizarían a medida que se acercaran a la estrella central. Algún mecanismo debe concentrar las masas de polvo y permitir que crezcan con rapidez suficiente para que no se destruyan de esa manera. Una posibilidad es la existencia de vórtices, flujos con patrones huracanados dentro del disco mismo. Las simulaciones numéricas predicen que los vórtices de los discos, si duran lo suficiente, atraparán y concentrarán partículas sólidas en sus centros.

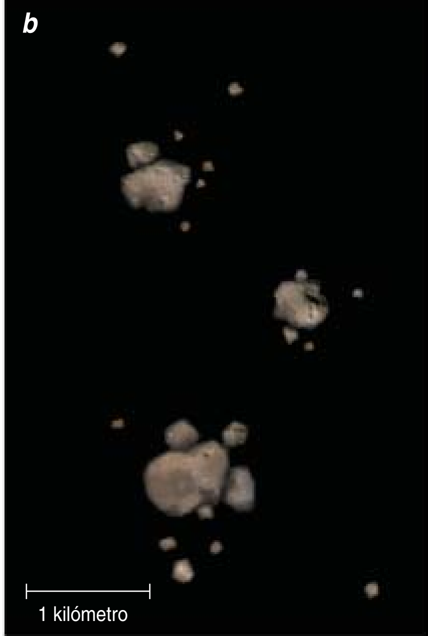
Otra posibilidad es que las partículas sólidas se asienten en una capa fina en el plano central del disco. Si esta capa adquiere una densidad y una masa suficientes, una especie de inestabilidad gravitatoria provocará que el polvo, el hielo o la gravilla generen objetos cada vez mayores. Alcanzado un tamaño determinado, esos nuevos cuerpos de varios kilómetros quedarán a salvo de la fuerza de arrastre ejercida por el gas circundante y no describirán una espiral hacia el interior.

A los cien mil años de su constitución, un disco protoestelar puede contener billones de planetesimales de unos kilómetros de diámetro. Lo de billones suena a algo impresionante, pero el disco no parecería superpoblado. La densidad del gas es millones de veces menor que la del aire al nivel del mar; entre los cuerpos de tamaño kilométrico mediarían distancias de miles de kilómetros de distancia. En un punto cualquiera de un disco así, sólo nos rodearía una profunda oscuridad, sin estrellas, sin rastro del joven sol que estaría naciendo cerca. Tendríamos la impresión de flotar en una nube molecular. El termómetro, sin embargo, mostraría una diferencia. Una nube molecular es sumamente fría; se encuentra a 5 o 10 kelvin; en cambio, las temperaturas del disco son mucho mayores: desde unos cientos, o incluso miles, de kelvin cerca de la estrella central a varias decenas de kelvin en los confines remotos.

En un sistema planetario tan primitivo, se formará hielo a expensas del vapor de agua cuando la temperatura sea inferior a los 150 kelvin. La isoterma de 150 kelvin de un disco protoestelar se encuentra más o menos a la distancia actual de Júpiter. Señala la "línea de nieve". Más allá, la frialdad estabiliza el hielo, pero la distancia al centro no es aún muy grande y sigue todavía alta la densidad de objetos. Los planetesimales de hielo se precipitan unos contra otros con cierta frecuencia.

Las colisiones, al menos las que ocurren a bajas velocidades, son sucesos pegajosos. Por ello, transcurridos miles de años habrá menos planetesimales, pero los que queden habrán adquirido mayor tamaño. Los que sufrieron más impactos al principio cuentan con la ventaja de una gravedad propia mayor; así atraen más materia y crecen a mayor velocidad que los demás planetesimales. Acabará por haber pocos y muy grandes, de miles de kilómetros. Absorberán los objetos de escasos kilómetros que haya en su vecindad. Y cuanto mayor

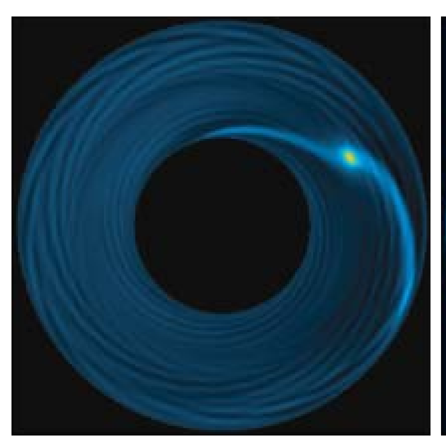


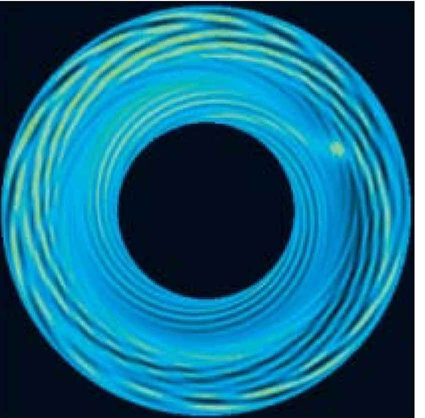


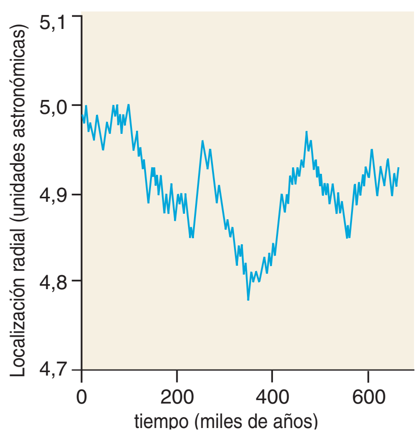


STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

3. LA TEORIA DE LA ACRECION NUCLEAR sostiene que la formación de planetas comienza cuando los granos de polvo presentes en el disco protoestelar colisionan, se adhieren y forman aglomerados de material sólido (*a*). Algunos aglomerados alcanzan un tamaño considerable; a estos cuerpos parecidos a los asteroides (*b*) se los llama "planetesimales", Una vez los planetesimales han adquirido una masa suficiente, atrapan gas del disco protoestelar y crecen con cierta rapidez (*c*).



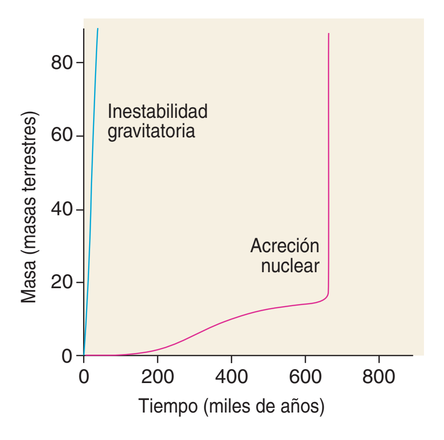




4. UNA DE LAS COMPLICACIONES con que tropiezan las teorías actuales de la formación planetaria es la estela de masa concentrada que un planeta en crecimiento deja tras de sí en su disco protoestelar. La rotación diferencial da una conformación espiral a la estela, con un brazo que se adelanta al planeta en su órbita y otro que se rezaga, como muestra la simulación informática (*izquierda*). Las fuerzas gravitatorias resultantes frenan el movimiento orbital del planeta, que se desplaza hacia el interior y con el tiempo acaba chocando contra la estrella central. Un planeta joven evitará ese destino si el disco donde crece presenta remolinos turbulentos (*centro*). Según las simulaciones numéricas, la turbulencia del disco hará que el planeta no emigre hacia el interior, sino que se mueva hacia fuera y hacia dentro de manera aleatoria (*derecha*).

vaya siendo su masa, más querrán y más extenderán su alcance.

Cuando ese cuerpo que crece, ahora un protoplaneta en toda regla, alcanza de 7 a 10 veces la masa de la Tierra, su gravedad empieza a atrapar cantidades apreciables de gas. Como resultado, se calienta su atmósfera y se expande hasta abarcar cientos de miles de kilómetros. Calentado por la compresión gravitatoria, el gas brilla con candentes colores rojos y proyecta luz infrarroja al espacio. La radiación va acompañada del lento enfriamiento y contracción de las capas inferiores, que deja espacio libre en las capas altas para atrapar más gas.



5. LOS DOS MODELOS predicen ritmos de formación planetaria distintos. La inestabilidad gravitatoria crea grandes planetas en unos miles de años (*línea azul*). Con la acreción nuclear se requieren cientos o miles de años, incluso millones, para que el núcleo sólido de un planeta aumente hasta que pueda atraer gas (*línea roja*). A partir de ahí crecerá más deprisa.

Por último, el crecimiento veloz acaba. Los alrededores todavía contienen cantidades ingentes de gas, pero la gravedad, demasiado débil, no afluye con rapidez sobre el inflado planeta, que sólo puede añadirse más gas al mismo ritmo con que radie el calor que ya tiene. En consecuencia, el planeta crece despacio durante el siguiente millón de años.

El nuevo mundo, aunque grande y robusto, ha de enfrentarse a una seria amenaza: la migración hacia el interior. La razón de este movimiento es sutil. Mientras el planeta adquiere masa, crece su atracción gravitatoria sobre el gas del disco. A medida que el planeta se desplaza a través del disco, deja tras de sí una estela de gas concentrado.

Un barco que surca aguas tranquilas abre una estela en V. La gravedad de un planeta que atraviesa gases tranquilos producirá una conformación parecida. En un disco, sin embargo, la rotación diferencial distorsiona el gas dentro de la estela del planeta. La parte de la estela más próxima a la estrella se adelanta al planeta, mientras que la opuesta se rezaga. El resultado es la aparición de una estela espiral (u "onda espiral") que define una región de mayor densidad gaseosa. La masa extra que va por delante ejerce una fuerza gravitatoria que acelera al planeta, mientras describe su órbita. Este empuje hacia delante hace ganar velocidad al planeta, que, en consecuencia, se desplaza hacia fuera a través del disco. La porción de la onda espiral que barre por detrás ejerce el efecto contrario: le quita energía orbital al planeta y provoca que se precipite hacia el interior.

En general, parece que la estructura de los discos planetarios lleva a que resulte más intensa la tendencia a migrar hacia dentro que hacia afuera. A semejante propensión planetaria al desplazamiento hacia el interior y subsiguiente destrucción se la conoce por "problema migratorio de tipo I". Se ignora por qué sortea la naturaleza tal destino. Pudiera darse el caso de que muchos núcleos protoplanetarios desapareciesen en espirales mortales. O bien, y quizá sea lo más probable, el disco haga de contrapeso para el planeta recién formado.

Adriane Steinacker, del Centro Ames de Investigación de la NASA, Fred C. Adams, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, y el autor acaban de demostrar que, si el disco es turbulento, un planeta en formación puede abandonar su derrotero hacia el interior y adoptar un movimiento alterno hacia dentro y hacia fuera. Así pues, quizás este problema



de los planetas en formación no resulte ningún contratiempo.

Hace una docena de años se ignoraba si las condiciones que dieron lugar al sistema solar eran universales, bastante comunes o raras. A lo largo de los últimos diez años, sin embargo, el asunto ha empezado a conocerse. Y ahora disponemos de una amplia diversidad de sistemas planetarios para compararlos con el nuestro. Distinguimos ya tipos de planetas y establecemos propiedades generales basadas en las estadísticas del censo actual.

El catálogo de planetas

La inmensa mayoría de los más de 200 mundos conocidos hasta ahora orbita alrededor de estrellas de tipo solar, estrellas corrientes de nuestros aledaños galácticos. Para analizar esta población se confecciona un diagrama masa-período, donde el período orbital de un planeta en torno a su estrella se dibuja en el eje de abscisas (x) y la masa que se le ha medido en el eje de ordenadas (y). Una variante consiste en representar las separaciones con respecto a la estrella central en vez de los períodos.

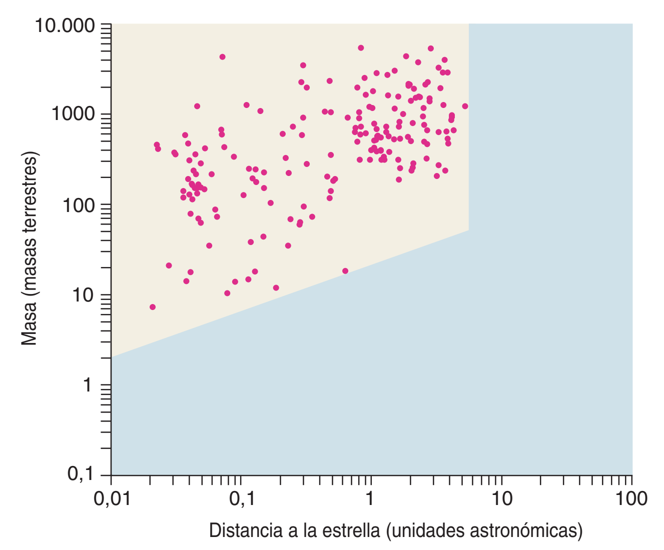
El diagrama descubre distintos grupos de planetas. El primer grupo, los jupíteres calientes, se parecen a 51 Peg b, con períodos orbitales de entre 29 horas y una semana. Puesto que casi rozan la superficie de sus estrellas, sufren grandes fuerzas de marea, que inexorablemente igualan los períodos de rotación con los períodos orbitales (como le pasa a la Luna). Las fuertes mareas modelan también sus órbitas, hasta darles forma circular, preferida desde el punto de vista energético.

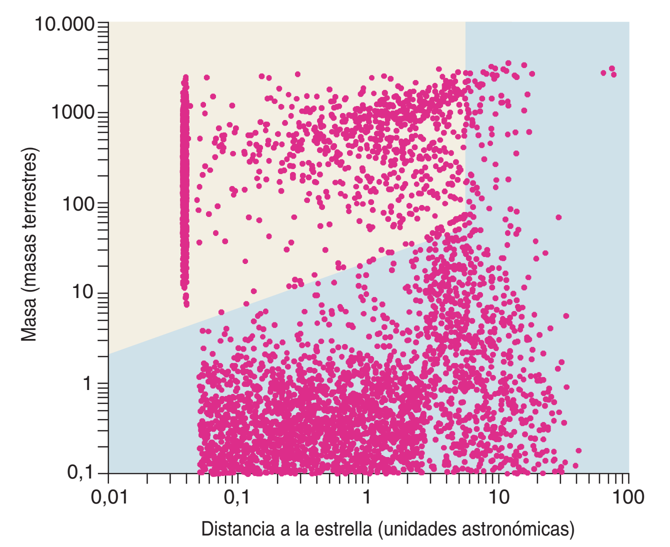
Un júpiter caliente suele orbitar a una distancia de unas 10 veces el radio de su estrella. Ese guarismo significa que hay una probabilidad próxima al 10 por ciento de observar desde la Tierra el paso del planeta por delante de la estrella: un "tránsito planetario". Su observación posee un alto valor científico. La medición de la fracción de la luz estelar que queda oculta determina el verdadero tamaño del planeta; combinado con la masa, proporciona su densidad, que a su vez indica en líneas generales la composición química. Hasta la fecha se han identificado diez tránsitos de planetas extrasolares.

En promedio, los radios de estos planetas son algo mayores que el de Júpiter. Se trata de gigantes de gas como Júpiter o Saturno, compuestos sobre todo de hidrógeno y helio. (Si fueran análogos sobredimensionados de la Tierra, con una composición primaria de rocas y metales, presentarían un tamaño harto menor.) Los modelos detallados muestran que los radios de los planetas con tránsito conocido se explican mejor si encierran un núcleo considerable, formado por elementos pesados. La presencia probable de estos núcleos dentro de los planetas con tránsito constituye una prueba notable en favor de la teoría de la acreción nuclear.

Uno de los planetas con tránsitos, HD 149026 b, parece tener un núcleo desproporcionado. De la parvedad de su radio se sigue que contiene unas 70 veces la masa de la Tierra en material sólido, encerrado dentro de 40 o 50 masas terrestres de hidrógeno y helio gaseosos y líquidos. Esta composición no es compatible con la formación planetaria a partir de inestabilidades gravitatorias. Pero también resulta difícil generalizar la teoría de la acreción nuclear para que explique ese mundo. Parece que un misterioso proceso todavía por identificar ha estado proporcionando una dieta constante de rocas, metales y posiblemente hielo a HD 149026 b, mientras el gas circundante se mantenía a distancia.

Se puede reconocer en el diagrama masa-período un segundo grupo importante de planetas. Los llamo "gigantes excéntricos" y presentan períodos orbitales más largos (desde una semana hasta casi una década). Acostumbran tener masas varias veces mayores que la media de los jupíteres calientes. Se hallan tan alejados de sus estrellas, que el efecto marea no logra que su órbita se vuelva circular; muchos de estos mundos describen trayectorias muy elípticas.





6. LOS PLANETAS EXTRASOLARES CONOCIDOS, ya más de 200, tienen masas bastante grandes y órbitas pequeñas (*izquierda*). Tales rasgos podrían resultar de un sesgo de las observaciones: es más fácil observar cuerpos de masa grande en órbitas cortas.

Una simulación numérica reciente (*derecha*) indica que la población actual planetaria contiene fuera del rango actual de detectabilidad muchos más planetas (*beis*); entre ellos los habrá de tamaño similar al de la Tierra y gigantes helados con órbitas de largo período.

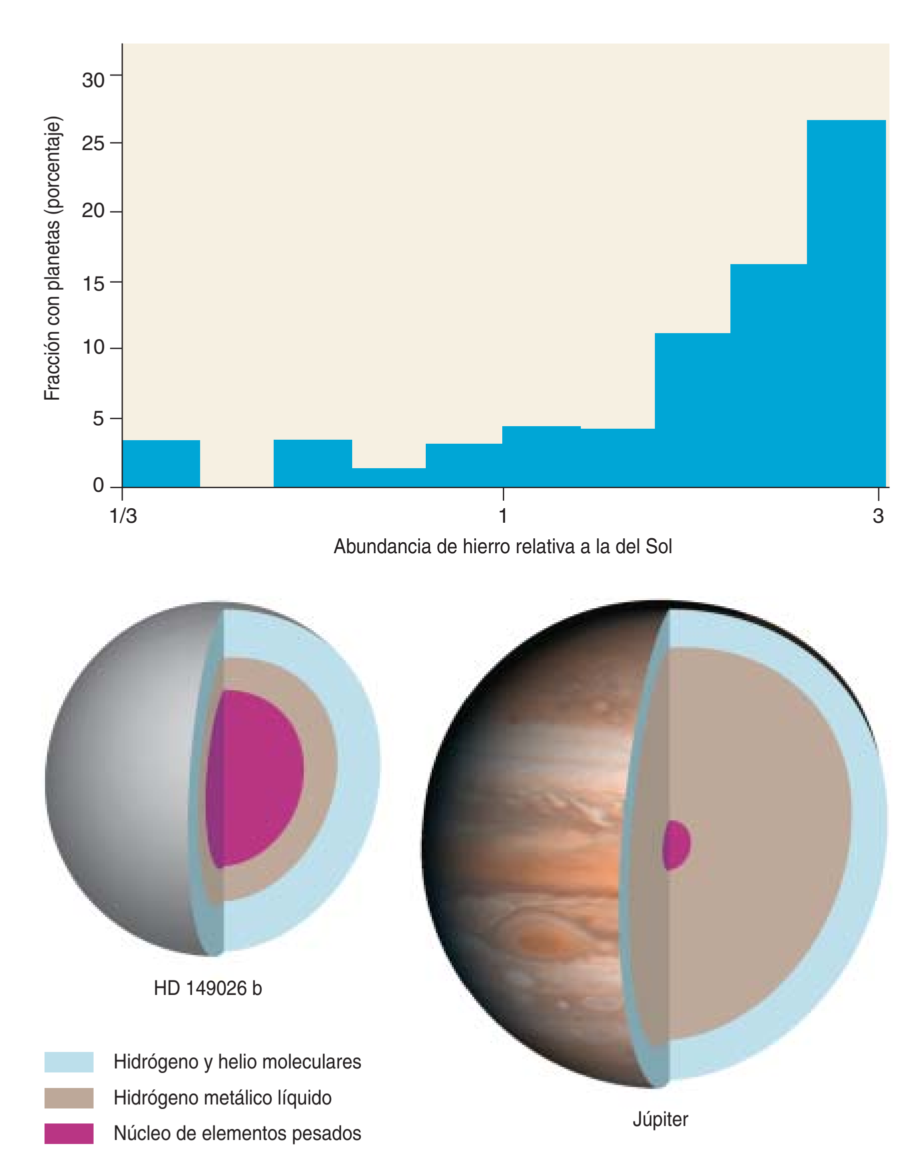
ADAPTADA DE S. IDA Y D.N.C. LIN, *The Astrophysical Journal*, vol. 616, págs. 567-572; 2004 (*gráfica de la derecha*); STEPHANIE FREESE Y DAVID SCHNEIDER/*American Scientist*

Puesto que en nuestro sistema solar no hay ni jupíteres calientes ni gigantes excéntricos, uno se inclinaría por concluir que nuestra situación es atípica. Aunque quizás acierte, se trata, no obstante, de una conjetura prematura. La forma del diagrama masa-período actual depende en muy buena medida de que los planetas que allí se representan son los que más fácil resulta observar. El método de rastreo —la observación de los desplazamientos Doppler causados por el movimiento de vaivén que los planetas inducen en sus estrellas— se muestra más sensible a los planetas de mayor masa (los que imprimen vaivenes de mayor amplitud) y de períodos cortos (porque permiten analizar las oscilaciones más rápidamente).

Las exploraciones planetarias nos han enseñado por ahora que al menos un júpiter caliente o un gigante excéntrico acompaña a algo menos del 10 por ciento de las estrellas de nuestro entorno. ¿Qué ocurre con el 90 por ciento restante? ¿Tienen cuerpos de la masa de Júpiter en órbitas de muy largo período y pequeños mundos rocosos en regiones interiores? ¿Carecen de planetas? Quizá la disposición planetaria de estas estrellas (cuando se pueda estudiarla) resulte una completa sorpresa, como lo fueron los planetas descubiertos hasta ahora.

Algo está fuera de toda duda: la respuesta demanda paciencia. Se están escrutando cerca de 5000 estrellas en busca de planetas. La mayoría de ellas se han incluido en los sondeos en los últimos años; bastantes han sido observadas sólo unas pocas veces. Parece probable, pues, que se necesiten otros 5 o 10 años más antes de que se cuente con una estadística fiable que esclarezca la posible atipicidad del sistema solar.

Los teóricos tenemos algo de tiempo para respirar. Aunque ni los jupíteres calientes ni los gigantes excéntricos se predijeron antes de su descubrimiento, quizás ahora sí podamos avanzar algunas predicciones que no se alejen demasiado de la realidad.



7. LA PROBABILIDAD DE DETECTAR UN PLANETA aumenta con la concentración de elementos pesados (como el hierro) de la estrella anfitriona. Se llama "metalicidad" a esa magnitud (*gráfica*). La presencia de elementos pesados en una estrella pone de manifiesto que el disco protoestelar del que nació contenía, aparte de gas, una gran cantidad de partículas sólidas. Esta dependencia de la metalicidad apoya el modelo de acreción nuclear, hipótesis según la cual la aglomeración de esos sólidos precede necesariamente a la formación de planetas. Otros datos que apoyan la acreción provienen del estudio de los pocos planetas que transitan por delante de sus estrellas. Tras medir la cantidad de luz bloqueada, se puede calcular el diámetro del planeta; conociendo su masa, se deduce entonces el tamaño del denso núcleo sólido. El planeta con tránsitos HD 149026 b, por ejemplo, parece contener un gran núcleo sólido (mayor que el de Júpiter), posiblemente rodeado por capas de hidrógeno y helio fluidos.

ADAPTADO DE FISCHER Y VALENTI, 2005 POR STEPHANIE FREESE (*arriba*); STEPHANIE FREESE (*abajo*)/*American Scientist*

Metales preciosos

Una información crucial acerca del proceso de la formación planetaria no procede de las características de los planetas, sino de las propiedades de sus estrellas. Debra A. Fischer, de la Universidad de California en Berkeley, Jeff A. Velenti, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y Nuno Santos, de la Universidad de Lisboa, con sus respectivos grupos, han demostrado que la probabilidad de que haya un planeta detectable depende de la fracción de elementos pesados presentes en la estrella anfitriona, parámetro conocido por "metalicidad". Algo menos del 2 por ciento de la masa del Sol, por ejemplo, corresponde a elementos pesados. Las estrellas con una metalicidad similar a la solar presentan una probabilidad de casi el 5 por

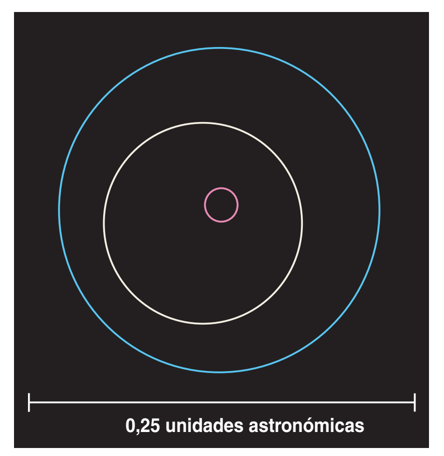
ciento de albergar un júpiter caliente o un gigante excéntrico que se pueda detectar con facilidad. Cuando la metalicidad de la estrella duplica la solar, la probabilidad de detectar un planeta se quintuplica con creces. De la misma manera, cuando las estrellas tienen metalicidades inferiores a la mitad de la solar, esa probabilidad cae por debajo del 1 por ciento.

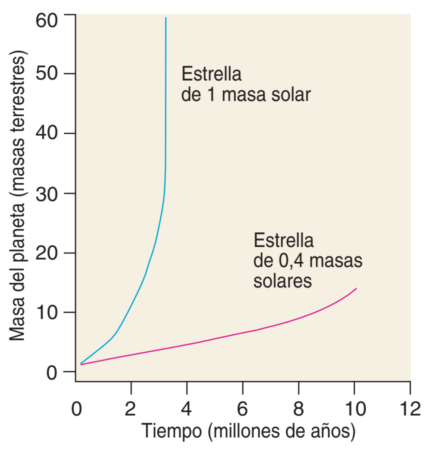
Esta conexión con la metalicidad respalda que la formación de la mayoría de los exoplanetas conocidos hasta ahora se produjo mediante la acreción nuclear. Las estrellas nacidas de discos ricos en metales (que contienen grandes cantidades de polvo sólido en movimiento y no sólo gas) deben de apresurar la acreción. Y cuando el núcleo en cuestión se forma deprisa, todavía hay suficiente gas en el disco para que la masa del planeta siga creciendo mucho.

Si la acreción fuera un proceso lento, el gas del disco se disiparía antes de que se formasen los gigantes gaseosos. Una acreción lenta, en cambio, permite generar núcleos del tamaño de Neptuno, aunque atrapen poco gas. Las estrellas menos ricas en metales que el Sol deberían tener cantidades considerables de planetas jovianos "fallidos".

Mi predicción es que el sistema solar tiene una configuración desacostumbrada, aunque no excepcional, ya que en él se ha formado un planeta joviano que no se ha desplazado en cuantía significativa hacia el interior. Creo que la arquitectura planetaria más común en la galaxia consistirá en la presencia de planetas de masa terrestre dentro de unas pocas unidades astronómicas (una unidad astronómica es unos 150 millones de kilómetros, la distancia entre la Tierra y el Sol), mientras que más lejos se hallarán planetas de la masa de Neptuno.

Tal presunción se basa en las simulaciones numéricas que he realizado con Adams y mi compañero de departamento Peter H. Bodenheimer. Según nuestros resultados, una estrella con el 40 por ciento de la masa solar necesita bastante más de 10 millones de años para convertirse en joviana. Tras 10 millones de años, sin embargo, el gas de la mayoría de los discos protoestelares ya no existe. La teoría de la acreación nuclear predice, en consecuencia, que las estrellas





8. GLIESE 876 pone en cuestión la teoría de la acreción nuclear. Esta estrella enana roja tiene dos planetas gigantes gaseosos en órbita (*azul y blanco*), junto con otro compañero más pequeño (*rosa*); se trata de uno de los varios sistemas planetarios múltiples conocidos (*izquierda*). Los modelos numéricos muestran que la acreción puede construir planetas grandes en unos millones de años si la masa de la estrella se parece a la del Sol. Pero para estrellas del tamaño de Gliese 876, la acreación opera demasiado despacio para que pueda constituirse un planeta grande antes de la disipación del disco, que suele suceder en 10 millones de años (*derecha*). La acreación nuclear, al menos tal y como se entiende hoy día, es incapaz de explicar cómo se ha formado en ese sistema un planeta gigante, y no digamos ya dos.

STEPHANIE FREESE (*izquierda*); GRAFICA ADAPTADA DE G. LAUGHLIN, P. BODENHEIMER Y F. C. ADAMS, *The Astrophysical Journal*, vol. 608, págs. 489-496; 2004 POR STEPHANIE FREESE (*gráfico*)/*American Scientist*

enanas rojas de masa moderada (las más numerosas de nuestra galaxia, con masas que no llegan ni a la mitad de la solar) deberían estar acompañadas por planetas de masa neptuniana; casi nunca tendrían compañeros con la masa de Júpiter.

Hasta ahora, la idea viene ratificándose. La observación de los vaivenes estelares ha descubierto planetas con la masa de Neptuno alrededor de 150 enanas rojas, cercanas a nosotros (y por tanto con brillo suficiente para ser estudiadas). Gracias a las "lentes gravitatorias", fenómeno ligado a la desviación de la luz por una masa, se han descubierto algunos más. En total, sólo se ha descubierto una estrella enana roja rodeada por un sistema con planetas de masa joviana.

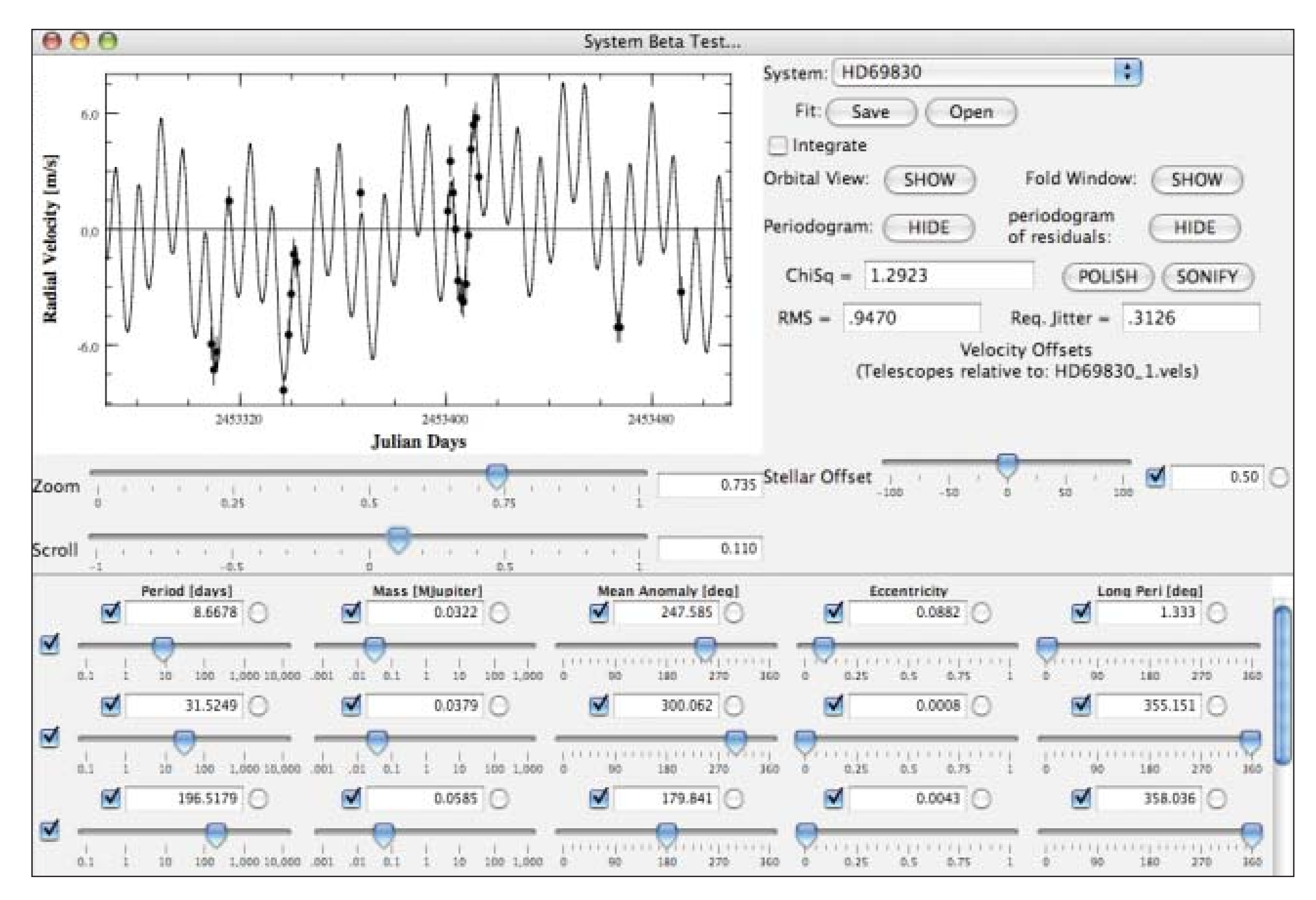
La enana roja que rompe la tendencia (Gliese 876) se encuentra a 15 años-luz de distancia de la Tierra. Aun así, brilla cien veces por debajo del umbral de visión humana. Alberga uno de los 10 sistemas planetarios múltiples conocidos. Tiene dos planetas de masa elevada, con órbitas de 30 y 60 días, y un planeta mucho más pequeño —7,5 veces la masa de la Tierra— en una órbita de 2 días.

Este curioso sistema proporciona mucha información sobre la génesis planetaria. Los dos grandes planetas exteriores se encuentran atrapados en órbitas resonantes: en promedio, el planeta más externo cubre una órbita en el tiempo en que el planeta del medio describe dos. Una configuración que se mantiene en virtud de las atracciones gravitatorias entre los dos cuerpos. Parece que el planeta exterior ha migrado hacia dentro, a través del disco original, con respecto al planeta del medio. Cuando se acercaron, entraron en resonancia. Un desplazamiento posterior llevó a los dos planetas hacia el interior, sincronizadas sus órbitas.

Cuesta entender que naciese un planeta gigante gaseoso, y mucho menos dos, mediante el proceso de acreción del núcleo en la corta vida del disco protoestelar de baja masa que acompañó el nacimiento de Gliese 876. Resulta, asimismo, difícil imaginar que este sistema reuniera las condiciones necesarias para que la inestabilidad gravitatoria creara planetas y que luego esa actividad se calmara lo suficiente para permitir el acople resonante de los dos planetas.

La inmensidad de lo desconocido

Gliese 876 avisa de que las teorías de formación planetaria carecen toda-



9. EL AUTOR Y SUS COLABORADORES están preparando un experimento público con el fin de descubrir sesgos sutiles en los métodos de detección y evaluación de sistemas planetarios. Con ese fin han escrito un sencillo programa para analizar las mediciones pertinentes (tanto reales como sintéticas). Lo ofrecen al público en Internet. Con esta herramienta, el usuario intenta encontrar parámetros orbitales que reproduzcan las observaciones (aquí se ve el ejemplo del sistema de tres planetas HD 69830).

GREGORY P. LAUGHLIN/*American Scientist*

vía de elementos importantes. Parece probable que el crecimiento galopante de objetos de masa joviana afecte a la estructura del disco, de suerte tal que se promueva el desarrollo rápido de otros planetas gigantes. En nuestro sistema solar, por ejemplo, la presencia de Júpiter pudo controlar el crecimiento de Saturno. El estudio de esta posibilidad es un área importante dentro de las investigaciones actuales.

El estudio de la interacción entre planetas quizá sirva para elucidar por qué los gigantes excéntricos suelen adquirir mayor masa que Júpiter o que los jupíteres calientes. Tal característica constituye, en mi opinión, un indicio de que muchos de los gigantes excéntricos surgieron en sistemas donde en un principio había varios planetas de masa grande, que luego modificaron mutuamente sus órbitas en un tira y afloja gravitatorio. Las simulaciones numéricas muestran que, con el tiempo, las interacciones mencionadas pueden conducir a la expulsión de los planetas más pequeños de esos sistemas, donde sólo permanecen los planetas de cierta entidad y órbita elíptica, según se ha observado.

Es obvio que las observaciones recogidas a lo largo de los últimos diez años han permitido perfilar la teoría, pero, ¿no conducirán a veces a error? Cuando un sistema lejano contiene más de un planeta, no cuesta separar la señal de vaivén inducida por cada uno de los componentes; así las órbitas se caracterizan con facilidad. Muchas de las observaciones más interesantes, sin embargo, como la de la estrella 55 Cancri (que tiene al menos cuatro planetas), resultan bastante arduas de analizar. Se necesita mucha perspicacia y sutileza para guiar el proceso, y cuando las interacciones gravitatorias entre los planetas son importantes, encontrar los modelos orbitales aceptables se convierte en una pesadilla computacional.

Este y otros aspectos espinosos hacen que resulte delicado interpretar las medidas del vaivén. Preocupa que algunas de las conclusiones estadísticas extraídas de estos resultados puedan estar sesgadas, que sean quizás hasta incorrectas. Para abordar el problema, investigadores de la Universidad de California en Santa Cruz y del Observatorio Naval y yo hemos emprendido un experimento. Hemos generado una galaxia virtual de 100.000 estrellas, algunas de ellas rodeadas por sistemas planetarios. El conjunto se halla pensado para que imite (en sentido estadístico) las características de los sistemas planetarios conocidos. A partir del tamaño y órbitas de estos mundos sintetizados se calculan los vaivenes de las estrellas anfitrionas tal y como se observarían desde la Tierra.

Nos proponemos analizar este conjunto artificial de datos con las técnicas y herramientas al uso. La

comparación de las interpretaciones de los datos de vaivén sintéticos con las configuraciones planetarias introducidas en la galaxia virtual calibrará nuestros sesgos intrínsecos y puntos ciegos.

Puesto que en el proceso de búsqueda de planetas interviene cierta subjetividad e intuición, queremos involucrar a tantos como sea posible (lo mismo astrónomos profesionales que aficionados). Con este fin, hemos generado un programa sencillo que analiza los datos de vaivenes (reales y virtuales) para encontrar los planetas escondidos en ellos. Es un código escrito en Java, la "Consola Sistémica", que ofrecemos al público en www.oklo.org. Aunque el experimento se encuentra en sus fases iniciales, esperamos que, a lo largo de los próximos uno o dos años, nos lleve a interpretar mejor el creciente conjunto de datos de vaivenes.

Aunque pudiéramos hallar algunos defectos en la actual caracterización de los mundos extrasolares, no creemos que se llegue a enmendar la conclusión fundamental del último decenio: que nuestra galaxia contiene miles de millones de planetas. ¿Se parecerá alguno a nuestro planeta, azul, cubierto de agua? No cabe asegurarlo, pero los años postreros nos han enseñado que los planetas terrestres son comunes y se forman con facilidad; algunos quizá ocupen órbitas adecuadas para la vida.

Más aún, las observaciones astronómicas deberían adquirir la sensibilidad suficiente para encontrar señales de fotosíntesis o de metanogénesis en las atmósferas de esos planetas remotos, si es que tales procesos biológicos se producen a gran escala. ¿Podría haber otros mundos con vida? Emociona pensar que los telescopios espaciales (empezando con las misiones Kepler y Corot, que se lanzarán dentro de unos años) respondan afirmativamente en el intervalo de nuestras vidas. Espero con ansiedad el día.

El autor

Gregory P. Laughlin obtuvo su doctorado en astronomía y astrofísica por la Universidad de California en Santa Cruz en 1994, justo un año antes de que el primer exoplaneta de una estrella de tipo solar fuera descubierto. Tras completar una serie de contratos posdoctorales —en el Observatorio Astronómico Nacional de Japón, la Universidad de Michigan en Ann Arbor, la Universidad de California en Berkeley y el Centro Ames de Investigación de la NASA— regresó en el año 2001 a la Universidad de California en Santa Cruz, donde ahora es miembro del departamento de astronomía y astrofísica.

Bibliografía complementaria

A SEARCH FOR SUBSTELLAR COMPANIONS TO SOLAR-TYPE STARS. B. Campbell, G. A. H. Walker y S. Yang en *The Astrophysical Journal*, vol. 331, págs. 902-921; 1988.

THE UNSEEN COMPANION OF HD114762 — A PROBABLE BROWN DWARF. D. W. Latham, R. P. Stefanik, T. Mazeh, M. Mayor y G. Burki en *Nature*, vol. 339, págs. 38-40; 1989.

A JUPITER-MASS COMPANION TO A SOLAR-TYPE STAR. M. Mayor y D. Queloz en *Nature*, vol. 378, págs. 355-359; 1995.

NEW WORLDS IN THE COSMOS: THE DISCOVERY OF EXOPLANETS. M. Mayor y P.-Y. Frei. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

TYPE I PLANETARY MIGRATION WITH MHD TURBULENCE. G. Laughlin, A. Steinacker y F. C. Adams en *The Astrophysical Journal*, vol. 608, págs. 489-496; 2004.

OBSERVED PROPERTIES OF EXOPLANETS: MASSES, ORBITS AND METALLICITIES. G. W. Marcy, R. P. Butler, D. A. Fischer, S. S. Vogt, J. T. Wright, C. G. Tinney y H. R. A. Jones en *Progress of Theoretical Physics*, suplemento n.º 158, págs. 24-42; 2005.

CATALOG OF NEARBY EXOPLANETS. R. P. Butler, J. T. Wright, G. W. Marcy, D. A. Fischer, S. S. Vogt, C. G. Tinney, H. R. A. Jones, B. D. Carter, J. A. Johnson, C. Mc-Carthy y A. J. Penny en *The Astrophysical Journal*, vol. 646, págs. 505-522; 2006.

WHEN EXTRASOLAR PLANETS TRANSIT THEIR PARENT STARS. D. Charbonneau, T. M. Brown, A. Burrows y G. Laughlin en *Protostars and Planets V*, dirigido por B. Reipurth, D. Jewitt y K. Keil. University of Arizona Press; Tucson, 2006.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

El calor que vino del frío

Más vale recuperar el calor presente en el entorno que producirlo. Tal hacen los intercambiadores de contracorriente y las bombas de calor

En las gélidas aguas del Artico, el cuerpo de la foca se enfriaría muy deprisa si su peculiar fisiología no redujera las pérdidas térmicas. La evolución ha provisto al animal de unos intercambiadores de calor vasculares que calientan la sangre venosa que retorna al corazón a costa de enfriar la sangre arterial que fluye hacia las aletas. Un intercambiador de calor suministra, a un cuerpo frío, la casi totalidad de la energía calorífica sobrante que contiene un cuerpo caliente. Cuando un contacto térmico simple iguala las temperaturas de los dos cuerpos, un intercambiador de contracorriente procede a intercambiarlas. Una bomba de calor lo hace aún mejor: extrae calor de un cuerpo que está más frío que el receptor de ese calor. ¿Cómo se logran tales transferencias?

Intercambiadores de contracorriente

En un intercambiador de contracorriente, la transferencia térmica se realiza por contacto entre dos fluidos que circulan en sentidos opuestos, como en los grandes intercambiadores que se utilizan para airear los edificios de viviendas. Esos dispositivos sustituyen el aire interior viciado y caliente por aire puro, menos caliente. Impulsadas por ventiladores, las masas de aire circulan por canalizaciones: los tubos de evacuación del aire caliente interior (por ejemplo, a 20 ºC) están en contacto con los que aspiran el aire frío exterior (por ejemplo, a 0 ºC).

Al entrar en el intercambiador, el aire frío se pone en contacto térmico con el aire viciado, ya enfriado y al final de su camino. Conforme avanza, el aire exterior atraviesa zonas cada vez más calientes; justo antes de salir, acaba de calentarse por contacto térmico con el aire interior, que está a 20 ºC y acaba de entrar en el intercambiador. Para que el calor fluya, a lo largo del recorrido se mantiene una diferencia de temperatura suficiente (alrededor de 1 ºC). Así, el aire exterior sale del intercambiador (entra al edificio) a 19 ºC.

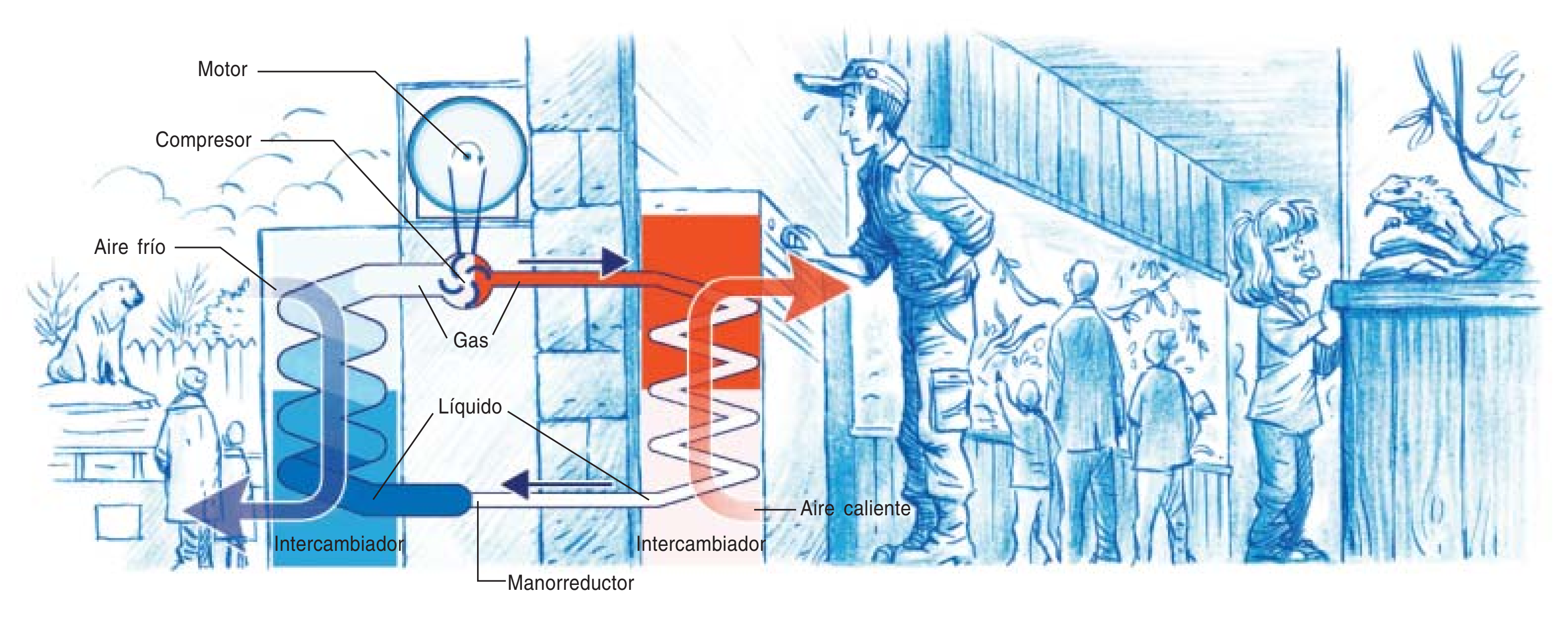
Ilustremos las ventajas de un intercambiador para el caso de un apartamento de 100 metros cuadrados. Si cada hora se reemplazan 250 metros cúbicos de aire a 20 ºC por aire fresco a 0 ºC que a continuación se calienta, la potencia de caldeo necesaria es de 1,7 kilowatt. En cambio, con un intercambiador que caliente el aire entrante mediante el aire saliente, basta con menos de 90 watt (el consumo de una bombilla eléctrica).

Un intercambiador en las patas

Los intercambiadores de contracorriente se emplean mucho en la industria. En las centrales nucleares, por ejemplo, se utilizan para recuperar la energía calorífica del agua del circuito primario que atraviesa el núcleo del reactor y que es radiactiva. Existen también en la naturaleza: por ejemplo, en el sistema vascular de las focas, los delfines y las aves de las regiones frías. Que la naturaleza haya seleccionado el sistema de contracorriente revela la eficacia del mismo: en las aves árticas, las arterias que conducen la sangre hacia las patas están en contacto íntimo con las venas que regresan de ellas; se evita así que al cuerpo suba sangre venosa fría.

En los mamíferos acuáticos y en los humanos, las arterias de los miembros no afloran sino en las articulaciones, únicos lugares donde se puede "tomar el pulso". Esas arterias están rodeadas de venas profundas a partir de

1. Las patas de las aves y las aletas de las focas contienen sistemas vasculares que operan como intercambiadores de contracorriente. El calor de la sangre arterial caldea la sangre venosa que regresa al corazón, lo que evita que el organismo se enfríe en exceso.



2. En una bomba de calor, la expansión de un fluido "bombea" el calor de un medio frío (aquí, la atmósfera invernal) que se transfiere de inmediato al medio que se desea caldear (aquí, el terrario). Primero líquido, un fluido se evapora, mediante la absorción de calor, en un intercambiador situado en la zona fría (*izquierda*). Aspirado por un compresor, el vapor se introduce en un segundo intercambiador situado en la zona caliente, donde se licua; devuelve así el calor recibido. El líquido producido retorna a la zona fría por medio de un manorreductor.

las cuales la sangre regresa al corazón cuando hace frío (si hace calor, la sangre pasa por venas superficiales). Cuando la sangre que circula por nuestras manos se enfría hasta 20 ºC, al retornar por las venas se calienta progresivamente por contacto con las arterias hasta los 37 ºC habituales.

La proeza de la bomba de calor

La bomba de calor realiza toda una hazaña: extrae calor no de un foco más caliente, sino de un foco más frío. Opera según el mismo principio que los frigoríficos. En la zona de donde se desea eliminar calor (la atmósfera, por ejemplo), se hace que un líquido se evapore bombeándolo a baja presión. Para ello, absorbe una cantidad importante de calor: el calor latente de vaporización. Este se extrae mediante un intercambiador en el medio frío (que se enfría más todavía): el aire exterior, por ejemplo. Aspirado por un compresor, el gas se inyecta en la parte a presión del circuito. Esa compresión lo licua en un segundo intercambiador; la licuación libera el calor latente antes absorbido. El líquido así formado retorna, a través de un manorreductor, a la zona de baja presión. El ciclo se reinicia.

La transferencia de calor se hace, pues, desde el frío hacia el calor. ¿A qué precio? El único gasto energético corresponde a la energía de alimentación del compresor. El segundo principio de la termodinámica impone la energía mínima que debe suministrarse: la relación entre el calor recibido por la casa y la energía suministrada (eléctrica) es inferior al cociente entre la temperatura absoluta (es decir, medida en kelvin) del foco caliente (la casa) y la diferencia de las temperaturas de los focos frío y caliente.

Para un foco caliente a 20 ºC y un foco frío a 0 ºC, el rendimiento energético es, pues, como mucho, igual a 293 kelvin (20 ºC) dividido por 20, o sea, casi 15 joules de energía térmica recibida por cada julio de energía eléctrica suministrada. En la práctica, las imperfecciones de los dispositivos no permiten alcanzar el rendimiento energético máximo: el calor aportado por una bomba de calor es sólo cuatro veces mayor que la energía consumida. Pero, a título de comparación, recordemos que un joule disipado en la resistencia de una estufa eléctrica aporta sólo un único joule de caldeo.

Dado que la eficacia de una bomba de calor es tanto mayor cuanto menor es la diferencia entre las temperaturas del foco caliente y el foco frío, parece preferible tomar el calor del suelo más que de la atmósfera. A varios metros de profundidad, la temperatura varía entre 10 ºC y 16 ºC, valores próximos a los 20 ºC deseables en una vivienda. Los intercambios entre la bomba de calor y el suelo se hacen por medio de un sistema de conductos subterráneos que transportan un líquido calorífero, una mezcla de agua y glicol, por ejemplo. Como la bomba de calor es una suerte de frigorífico que enfría el exterior, pueden construirse bombas que operen en ambos sentidos, capaces por ello de enfriar el interior. Durante el verano, la bomba extrae energía calorífica de la casa para cederla al subsuelo, que se calienta algunos grados (unos 5 ºC). Ese calor se difunde tan lentamente alrededor de las tuberías que permanece en las proximidades durante meses. Si se toma la precaución de espaciar los tubos enterrados lo necesario para no perturbar el equilibrio térmico del subsuelo, se logra almacenar calor durante el verano para gastarlo en invierno.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

Los logaritmos de Briggs

Verano de 1615. El matemático Henry Briggs cruza Gran Bretaña en diligencia. Hace meses cayó en sus manos el recién publicado *Mirifici logarithmorum canonis descriptio* de John Napier. Supo entonces que se hallaba ante una obra de importancia histórica. Ha escrito varias cartas al autor del tratado, alabando su trabajo y proponiendo algunas mejoras. Napier está de acuerdo con ellas, pero a sus 65 años no se ve con fuerzas para llevarlas a cabo. Briggs, catedrático del Gresham College de Londres, donde años después se originaría la Royal Society, se dirige hacia Edimburgo para conocer al maestro.

Llega con bastante retraso a la cita. Llama a la puerta de la casa de Napier y, según William Lilly, los dos hombres pasan más de un cuarto de hora contemplándose con admiración y sin pronunciar palabra. Finalmente, Briggs dice: “Señor, he realizado este largo viaje con el propósito de veros en persona y conocer por qué suerte de ingenio o inteligencia vinisteis a ser el primero en concebir ésta la más excelente ayuda a la astronomía: los logaritmos”.

El mes pasado reconstruimos con algún detalle el nacimiento de los logaritmos y el trabajo de Napier. La idea fundamental, que se remonta a Arquímedes, consiste en relacionar una lista de números en progresión geométrica (los elementos consecutivos tienen cocientes iguales) con otra en progresión aritmética (los elementos consecutivos tienen diferencias iguales). Lo que Briggs le propuso a Napier en aquella visita fue utilizar como base para los logaritmos el número 10. Esta idea les condujo a la moderna definición de logaritmo en base 10: el logaritmo de un número x es el exponente y al que hay que elevar 10 para obtener x, es decir, y es el logaritmo de x si $x = 10^y$.

Después del encuentro de 1615, Briggs trabajó sobre estas ideas hasta publicar en 1624 la *Arithmetica Logarithmica* (en latín), la primera tabla de logaritmos en base 10 de la historia, calculados con tal precisión que apenas tuvo que ser corregida en los cuatro siglos siguientes. Como en el caso de Napier, lo más interesante del trabajo de Briggs fue el ingenio desplegado para reducir en lo posible los cálculos necesarios para la elaboración de la tabla. También Briggs descubrió trucos que vislumbraban la que luego sería la herramienta más potente de la matemática: el cálculo diferencial, desarrollado por Newton y Leibniz a finales del siglo XVII.

El enfoque de Briggs, sin embargo, fue distinto del seguido por Napier. Si éste utilizó un símil geométrico para definir sus logaritmos, Briggs se basó únicamente en operaciones algebraicas. Su método radica en un ingenioso truco para calcular logaritmos de números muy cercanos a la unidad.

Briggs comienza calculando la raíz cuadrada de 10, luego la raíz cuadrada del resultado, y así sucesivamente hasta 54 veces. Hoy se pueden hacer estas operaciones con una calculadora de bolsillo en unos pocos segun-

10 D ARITHMTICA E

	Numeri continue Medij inter Denarium & Vnitatem.	Logarithmi Rationales.
	10	1,000
1	31622,77660,16837,93319,98893,54	0,50
2	17782,79410,03892,28011,97304,13	0,25
3	13335,21432,16332,40256,65389,308	0,125
4	11547,81984,68945,81796,61918,213	0,0625
5	10746,07828,32131,74972,13817,6538	0,03125
6	10366,32928,43769,79972,90627,3131	0,01562,5
7	10181,51721,71818,18414,73723,8144	0,00781,25
8	10090,35044,84144,74377,59005,1391	0,00390,625
9	10045,07364,25446,25156,64670,6113	0,00195,3125
10	10022,51148,29291,29154,65611,7367	0,00097,65625
11	10011,24941,39987,98758,85395,51805	0,00048,82812,5
12	10005,62312,60220,86366,18495,91839	0,00024,41406,25
13	10002,81116,78778,01323,99249,64325	0,00012,20703,125
14	10001,40548,51694,72581,62767,32715	0,00006,10351,5625
15	10000,70271,78941,14355,38811,70845	0,00003,05175,78125
16	10000,35135,27746,18565,08581,37077	0,00001,52587,89062,5
17	10000,17567,48442,26738,33846,78274	0,00000,76293,94531,25
18	10000,08783,70363,46121,46574,07431	0,00000,38146,97265,625
19	10000,04391,84217,31672,36281,88083	0,00000,19073,48632,8125
20	10000,02195,91867,55542,03317,07719	0,00000,09536,74316,40625
21	10000,01097,95873,50204,09754,72940	0,00000,04768,37158,20312,5
22	10000,00548,97921,68211,14626,60250,4	0,00000,02384,18579,10156,25
23	10000,00274,48957,07382,95091,25449,9	0,00000,01192,09289,55078,125
24	10000,00137,24477,59510,83282,69571,5	0,00000,00596,04644,77539,0625
25	10000,00068,62238,56210,25737,18748,2	0,00000,00298,02322,38769,53125
26	10000,00034,31119,22218,83912,75020,8	0,00000,00149,01161,19384,76562,5
27	10000,00017,15559,59637,84719,93879,1	0,00000,00074,50580,59692,38281,25
28	10000,00008,57779,79451,03051,17588,8	0,00000,00037,25290,29846,19140,625
29	10000,00004,28889,89633,54198,42901,3	0,00000,00018,62645,14923,09570,3125
30	10000,00002,14444,94793,77767,42970,4	0,00000,00009,31322,57461,54785,15625
31	10000,00001,07222,47391,14050,70926,8	0,00000,00004,65661,28730,77392,57812,5
32	10000,00000,53611,23594,13317,14831,4	0,00000,00002,32830,64365,38696,28906,25
33	10000,00000,26805,61846,70731,51508,7	0,00000,00001,16415,32182,69348,14453,125
34	10000,00000,13402,80923,26383,99277,7	0,00000,00000,58207,66091,34674,07226,5625
35	10000,00000,06701,40461,60946,55519,6	0,00000,00000,29103,83045,67337,03613,28125
36	10000,00000,03350,70230,79911,91730,2	0,00000,00000,14551,91522,83668,51806,64062,5
37	10000,00000,01675,35115,39815,61857,6	0,00000,00000,07275,95761,41834,25903,32031,25
38	10000,00000,00837,67557,69872,72426,9	0,00000,00000,03637,97880,70917,12951,66015,625
39	10000,00000,00418,83778,84927,59087,9	0,00000,00000,01818,98940,35458,56475,83007,8125
40	10000,00000,00209,41889,42461,60262,5	0,00000,00000,00909,49470,17729,28237,91503,90625
41	10000,00000,00104,70944,71230,25311,0	0,00000,00000,00454,74735,08864,64118,95751,95312
42	10000,00000,00052,35472,35614,98950,4	0,00000,00000,00227,37367,54432,32059,47875,97656
43	10000,00000,00026,17736,17807,46048,9	0,00000,00000,00113,68683,77216,16029,73937,98828
44	10000,00000,00013,08868,08903,72187,8	0,00000,00000,00056,84341,88608,08014,86968,99414
45	10000,00000,00006,54434,04451,85869,75	0,00000,00000,00028,42170,94304,04007,43484,49707
46	10000,00000,00003,27217,02225,92881,337	0,00000,00000,00014,21085,47152,02003,71742,24853
47	10000,00000,00001,63608,51112,96427,283	0,00000,00000,00007,10542,73576,01001,85871,12426
48	10000,00000,00000,81804,25556,48210,295	0,00000,00000,00003,55271,36788,00500,92935,56213
49	10000,00000,00000,40902,12778,24104,311	0,00000,00000,00001,77635,68394,00250,46467,78106
50	10000,00000,00000,20451,06389,12051,946	0,00000,00000,00000,88817,84197,00125,23233,89053
51	10000,00000,00000,10225,53194,56025,921 L	0,00000,00000,00000,44408,92098,50062,61616,94526
52	10000,00000,00000,05112,76597,28012,947 M	0,00000,00000,00000,22204,46049,25031,30808,47263
53	10000,00000,00000,02556,38298,64006,470 N	0,00000,00000,00000,11102,23024,62515,65404,23631
54	10000,00000,00000,01278,19149,32003,235 P	0,00000,00000,00000,05551,11512,31257,82702,11815

1. Las 54 raíces cuadradas sucesivas de 10, tal y como aparecen en la *Arithmetica*.

dos, pulsando la tecla raíz 54 veces. Si su calculadora no tiene suficiente precisión, verá que el resultado final es 1. Sin embargo, el valor real no es exactamente la unidad. Briggs realizó el cálculo con 30 cifras decimales, tal y como vemos en la figura 1, tomada de la *Arithmetica*. El último número es un 1 seguido de 16 ceros y de 14 cifras más. Es en realidad la raíz 2^{54}-ava de 10, o $10^{1/2^{54}}$, puesto que extraer una raíz cuadrada es equivalente a dividir entre dos el exponente de una potencia: $\sqrt{10^n} = 10^{n/2}$. En la columna de la izquierda de la tabla se muestran las raíces; en la de la derecha, Briggs escribe los exponentes correspondientes, es decir, los logaritmos de los números de la izquierda. Si en la columna de la izquierda cada número es la raíz cuadrada del anterior, en la columna de la derecha cada número o logaritmo es la mitad del anterior, puesto que así cambian los exponentes cuando se extrae la raíz cuadrada de una potencia.

Los últimos números de la tabla tienen una curiosa propiedad: si nos olvidamos del 1 y sólo atendemos a la parte decimal, vemos que el último número es exactamente la mitad del penúltimo, a pesar de que aquél es la raíz cuadrada de éste. En notación moderna:

$$\sqrt{1 + \varepsilon} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$$

Como vemos en esta fórmula, la parte decimal ε de un número cercano a la unidad se divide entre dos cuando extraemos la raíz cuadrada. Se trata en realidad de una aproximación. Hoy sabemos que el error en la fórmula anterior es del orden de ε^2, que en el caso de los últimos números de la tabla de Briggs afecta precisamente a la trigésima cifra decimal.

Una vez convencido de que, en las cercanías de la unidad, números y logaritmos se comportan igual, se pueden aplicar simples reglas de tres para obtener el logaritmo de cualquier número cercano a 1. Para hacerlo de forma sistemática, Briggs calculó el logaritmo de $1 + 10^{-16}$, es decir, de un 1 seguido de la coma decimal, de 15 ceros y de un 1. La regla de tres, tal y como la describe Briggs, se puede ver en la figura 2. En realidad, lo que está haciendo Briggs con estas reglas de tres es utilizar la *aproximación lineal* del logaritmo, que hoy escribimos:

$$\log_{10}(1 + \varepsilon) \approx k\varepsilon$$

Si aplicamos esta fórmula a la raíz 2^{54}-ava de 10, podemos obtener k dividiendo el último número de la segunda columna por los decimales del último de la primera columna de la figura 1. Esto es lo que se hace en el pasaje de la *Arithmetica* presentado en la figura 2. El resultado es $k = 0{,}43429448190325$. Hoy sabemos que k es en realidad la derivada del logaritmo en base 10, es decir, $k = \log_{10}(e) = 1/\ln(10)$, cuyo valor es el calculado por Briggs con una exactitud de 14 cifras decimales. El número e, como en el caso de Napier, estaba presente en los cálculos de Briggs sin que tampoco fuera consciente de la importancia que tendría después en la matemática y la física.

Con la aproximación lineal, a la que Briggs llamó la *regla de oro*, podía calcular mediante reglas de tres el

pro-
port.
12781,91493,20032,34416,5 } Notæ significatiuæ post quindecim cyphras unitati
1 - - - - - - - - - - - - - } adjiciendæ.
55511,15123,12578,27021,18158 } Notæ significatiuæ post Characteristicam (quæ est cy-
43429,44819,03251,804 - - - - } phra) & alias sexdecim cyphras in Logarithmis
scribendæ.

2. La regla de oro de Briggs aplicada al cálculo de $\log_{10}(e)$.

logaritmo de cualquier número suficientemente próximo a 1. El problema es que necesitaba que fueran extremadamente próximos a 1, más en concreto, que fueran un 1 seguido de 15 ceros decimales. Esta es una limitación considerable. Sin embargo, la idea de Briggs fue "llevar" cualquier número hacia las proximidades de la unidad calculando raíces cuadradas, igual que había hecho con el 10. Es una tarea formidable, pero encontró muchos trucos para hacerla más viable. Por ejemplo, para calcular el logaritmo de 2, primero lo elevó a la décima potencia, cuyo resultado es 1024, y luego lo dividió por 1000, obteniendo 1,024. Con ello, le bastó calcular 47 raíces cuadradas para obtener 1 y 15 ceros después de la coma decimal. Después de esos 15 ceros obtuvo 16851605705394977. Aplicando la regla de oro, calculó el logaritmo ℓ de este número y luego deshizo todas las operaciones en el campo de los logaritmos: multiplicó ℓ por 2^{47} para "deshacer" las 47 raíces cuadradas, al resultado le sumó 3, que es el logaritmo de 1000, y el resultado lo dividió entre 10 para "deshacer" la potencia inicial. Finalmente obtuvo:

$$\log_{10}(2) = 0{,}301029995663981195$$

y, como pueden comprobar con una calculadora suficientemente potente, las 18 cifras que Briggs obtuvo son exactas. Utilizando estos trucos y otros métodos de interpolación, pudo finalmente elaborar una tabla con los logaritmos de los números enteros de 1 a 20.000 y de 90.000 a 100.000, que ha sido utilizada por científicos e ingenieros durante los últimos cuatro siglos para realizar toda clase de cálculos. Pueden encontrar en Internet la *Arithmetica* completa y anotada por Ian Bruce, de la Universidad de Adelaida. Los logaritmos también sirvieron para diseñar las *reglas de cálculo*, a las que INVESTIGACIÓN Y CIENCIA dedicó un interesante artículo el pasado mes de julio de 2006.

El trabajo de Napier y Briggs es realmente impresionante. Aún más si se tiene en cuenta que la notación decimal se había introducido en Europa apenas treinta años antes. (Napier fue uno de los primeros en utilizarla y propagarla.) A veces creemos que en aquella época el desarrollo científico era mucho más lento que en la actualidad. Sin embargo, el siglo XVII puede considerarse "frenético" desde el punto de vista científico. Mientras Napier y Briggs desarrollan los logaritmos, Kepler racionaliza la astronomía y Galileo describe el movimiento en términos matemáticos. Unos cincuenta años después del encuentro de Napier y Briggs, Newton concibe los *Principia*. Y en esta explosión intelectual, una de las más importantes para todo el pensamiento occidental, aquel encuentro en Edimburgo, en el verano de 1615, fue sin duda decisivo.

parr@seneca.fis.ucm.es

Mark Fischetti

RECICLADO DE PAPEL

Fibras puras

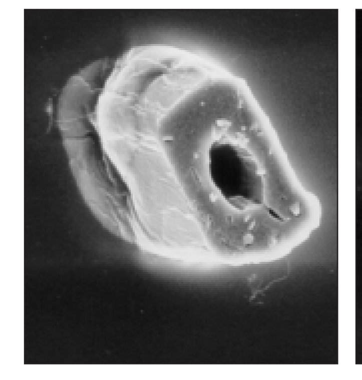
Según distintas estimaciones, gracias a la colaboración ciudadana el mundo recicla ya más del 50 por ciento del papel que gasta. Por todas partes surgen plantas de reciclado. Con todo, a causa de una peculiaridad de las fibras de la madera, nunca podremos prescindir de los árboles.

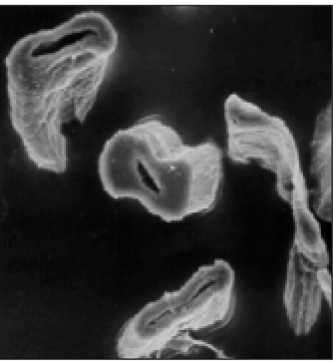
La pulpa virgen contiene abundantes moléculas de agua que facilitan la unión, mediante puentes de hidrógeno, que mantiene trabadas las fibras contiguas cuando se transforman en papel. Pero cada vez que una fibra se limpia, se destinta y se seca en una planta de reciclado, se recupera sólo el 80 por ciento de la trabazón, explica Yulin Deng, del Instituto de Tecnología de Georgia. Tras cuatro o cinco reciclados, una fibra ya no se traba con fuerza suficiente y se convierte en desecho.

Los ingenieros no pueden hacer mucho para salvar esa limitación física. Por ello se concentran en la reducción de los costos de reprocesado de fibras menos usadas. Uno de los retos consiste en depurar los métodos de neutralización de "pegotes", el revoltijo de adhesivos procedentes de sellos de correos, etiquetas, precintos, cintas adhesivas, lomos de publicaciones y un sinnúmero de otros orígenes. Toda esa materia indeseable, muy deformable, escapa a los tamices destinados a capturarla y atasca la maquinaria, por lo que se requiere una etapa de "cribado fino", de gran consumo energético, para aprisionarla. La industria busca un procedimiento químico para deshacer los pegotes, pero no lo ha resuelto del todo. Parte de la dificultad reside en minimizar la contaminación de las masas de agua empleada en el reprocesado, que por su parte hay también que depurar y reutilizar.

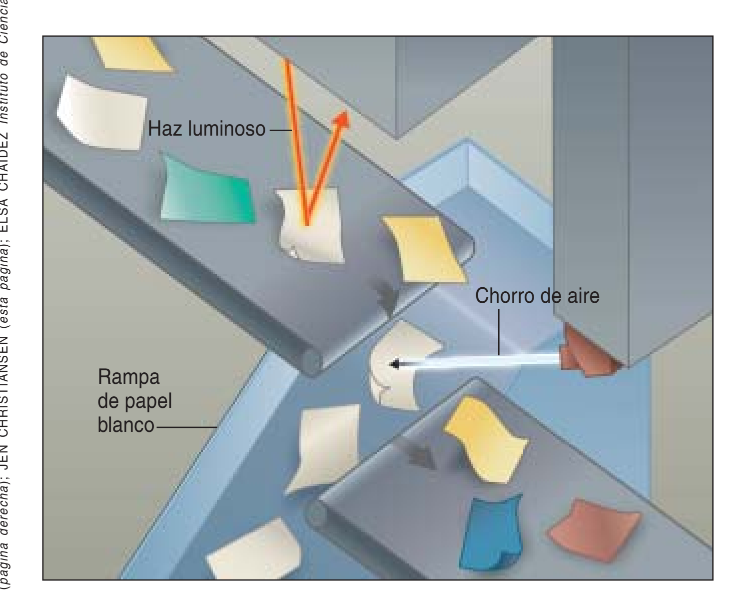
Una clasificación más eficiente reduciría los costes, lo que aumentaría la demanda de papel reciclado y ahorraría espacio en los vertederos. Aunque en algunos municipios separen el papel (en cartones y papel de prensa, por ejemplo), la mayoría de los desechos llegan mezclados a los centros de recogida. Alrededor de un 95 por ciento se desenmarañan a mano, un trabajo muy caro. Hasta hace poco no se han comenzado a vender máquinas clasificadoras automáticas; los sensores para mejorarlas están aún en desarrollo. En la opinión de Richard A. Venditti, de la Universidad estatal de Carolina del Norte, una maquinaria más refinada ahorraría costes y alimentaría la línea de reprocesado con un flujo de entrada más homogéneo, lo que reduciría el consumo de sustancias químicas, agua y energía.

SAMUEL VELASCO 5w Infographics (*página derecha*); JEN CHRISTIANSEN (*esta página*); ELSA CHAIDEZ *Instituto de Ciencia y Tecnología del Papel* (*micrografías*)





1. LA CELULOSA (*izquierda*), o fibra vegetal, contiene abundantes moléculas de agua que facilitan la trabazón, mediante puentes de hidrógeno, que mantiene unidas las fibras contiguas cuando éstas se prensan para obtener papel. Con cada reciclado se aplasta y reseca las fibras hasta que quedan tan retorcidas y rígidas, que dejan de ofrecer superficie suficiente para la trabazón (*derecha*). Terminan convirtiéndose en residuos.



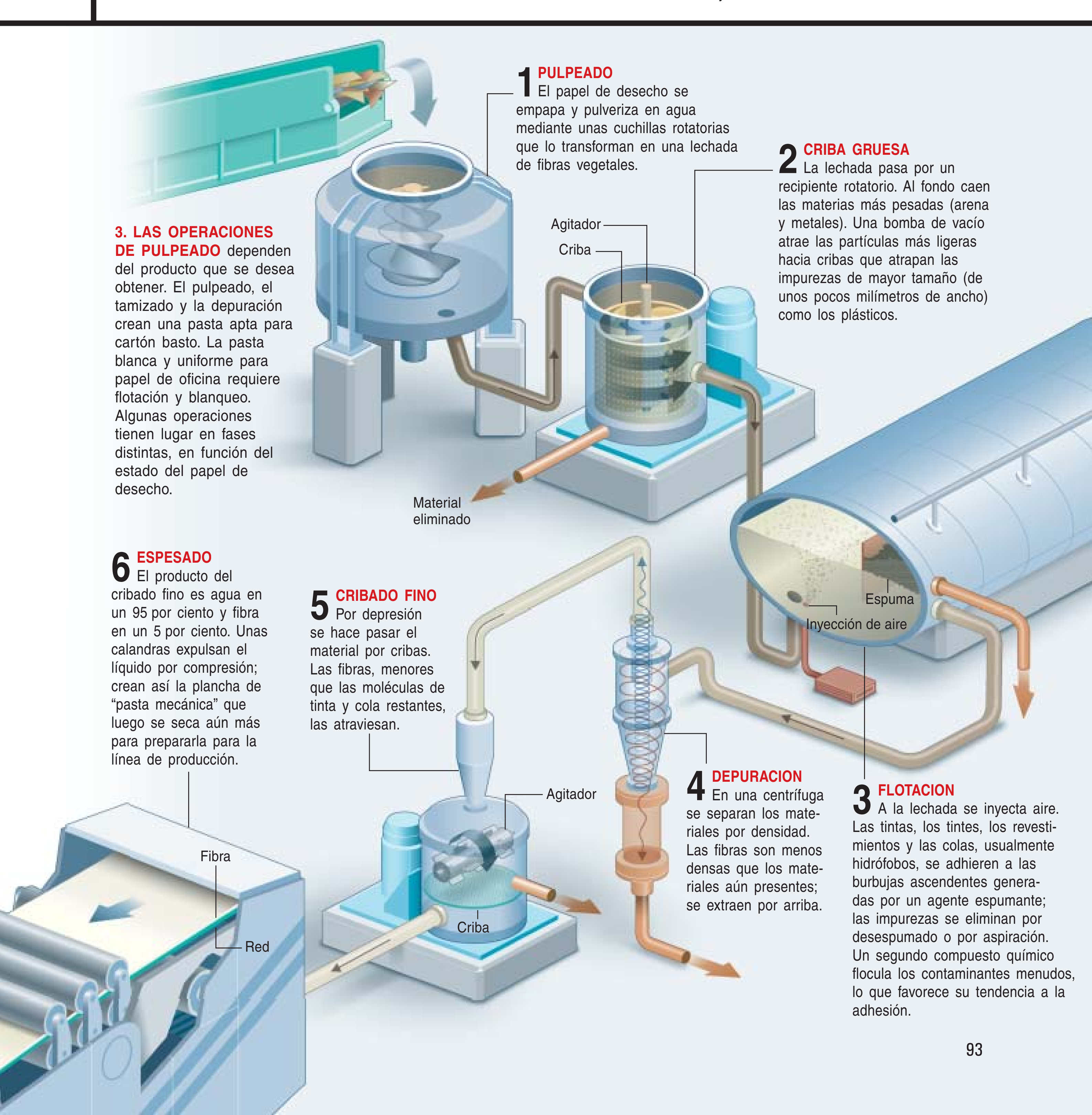
2. UNOS CLASIFICADORES AUTOMATICOS, relativamente nuevos, se sirven de brazos mecánicos para reducir el espesor de un flujo de papel de desecho: forman una capa sobre una banda transportadora (*no se muestra*). Haces de luz visible y del infrarrojo próximo identifican cada pieza por su color o brillo; unos chorros de aire la impulsan hacia la rampa de recogida adecuada.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **RECORTE DE COSTES:** Las calidades superiores de pulpa reciclada requieren un número mayor de etapas de reprocesado; su coste se eleva progresivamente hasta el de la pulpa virgen de los árboles. En general, el cartón de las cajas de cereales y de zapatos obtenido de material reciclado es más barato que un producto similar obtenido de fibra nueva. Las cajas corrugadas y el papel de prensa cuestan algo menos. No hay ahorro real en el papel de oficina.

➤ **HABITOS CIUDADANOS:** Según la Asociación Forestal y Papelera estadounidense, en torno al 86 por ciento de los residentes en EE.UU. tienen acceso al reciclado a través de los cubos de basura de su domicilio o de los contenedores callejeros. La participación es elevada, pero aún puede mejorar. Los colegios propenden menos al reciclado; las empresas todavía menos. Los países en crecimiento rápido, como China, desean comprar más papel de desecho como materia prima barata.

➤ **CLASIFICAR SOBRE LA MARCHA:** Los sensores de las primeras máquinas clasificadoras automáticas identifican sobre todo el color del papel que pasa por una cinta transportadora; así separan, por ejemplo, las bolsas de papel marrón del papel de fotocopiadora. Otros sensores más refinados distinguen entre el blanco y negro del papel de oficina y el del papel de prensa, así como diferencias de lustre entre embalajes de artículos de consumo.



Historia de la anatomía

Importancia del grabado

ZERGLIEDERUNGEN - ANATOMIE UND WAHRNEHMUNG IN DER FRÜHEN NEUZEIT. Preparado por Albert Schirrmeister en colaboración con Mathias Pozsgai. Vittorio Klostermann; Frankfurt am Main, 2005.

ATLAS DE ANATOMÍA HUMANA Y CIRUGÍA. J. M. Bourgery y N. H. Jacob. Edición preparada por Jean-Marie Le Minor y Henri Sick. Taschen; Colonia, 2006.

La anatomía humana, ciencia que estudia la constitución y morfología del cuerpo, avanzó con las técnicas de disección y se propagó con el desarrollo de las artes de reproducción. Anatomía e ilustración han ido de la mano en el curso de la historia (*Zergliederungen - Anatomie und Wahrnehmung in der Frühen Neuzeit*). Entre las obras más hermosas y logradas, el *Traité complet de l'anatomie de l'homme*, de J. M. Bourgery y N. H. Jacob. Obra monumental, *in folio*, consta de 2108 páginas de texto y 725 láminas con 3750 figuras.

Durante tiempo la fuente principal del conocimiento anatómico advino de la disección de animales. Aunque no es cierto que uno de los primeros sistemáticos, Galeno (c. 130-c. 200), médico griego que ejerció en Pérgamo y Roma y que tuvo una considerable influencia hasta el siglo XVI, no abriera cadáveres. Pese a todo, la anatomía de los simios le servía, creyó, de análogo fiable. Galeno asociaba estructura y función, anatomía y fisiología, en sus múltiples escritos sobre huesos, músculos, vasos, nervios y órganos. Lejana todavía la histología, en su tiempo seguía vigente la famosa distinción de la zoología aristotélica sobre los últimos componentes u homeomerías.

En la Edad Media, la única obra de anatomía realmente digna de recibir tal nombre fue la de Mondino dei Luzzi escrita en 1319. En *Anathomia*, Mondino sigue a Galeno con aportaciones propias interesantes, observadas sobre disecciones humanas que había realizado en 1315. Los textos de anatomía difundidos en el Medievo apenas si contenían ilustraciones y las escasas aducidas caían en un esquematismo ingenuo.

Con la invención de la imprenta por Johann Gensfleisch (Gutenberg) hacia 1450, el panorama se transformó. Entre los incunables figura la edición príncipe de la *Anathomia* de Mondino, impresa en 1478, reeditada en múltiples ocasiones, una de ellas comentada por Berengario da Carpi, publicada en 1521. Berengario trabajó sobre cadáveres humanos. Otro incunable importante fue la *Anatomia sive historia corporis humani* (1493), de Alessandro Benedetti, troquelador del lenguaje anatómico moderno y creador del anfiteatro de la Universidad de Padua. No pudieron, sin embargo, los médicos humanistas disfrutar con los dibujos anatómicos de Leonardo da Vinci, cuyas láminas manuscritas de una calidad científica extraordinaria no se publicarían hasta 1898.

En 1543 apareció en Basilea *De humani corporis fabrica*, de Andrés Vesalio. Las limitaciones y deficiencias que el análisis científico de esta obra cumbre de la historia de la anatomía está descubriendo no empecen su eficacia radicalmente innovadora de la disciplina. En adelante, la anatomía se dividirá en prevesaliana y vesaliana, partición con un significado teórico por encima del sentido cronológico. Atiende a la estructura (partes constructivas, unitivas y órganos), pero deja de lado la función. Pocos años después apareció el tratado de Charles Estienne *De dissectione partium corporis humani*, otra anatomía valiosa, cuya elaboración, sin embargo, había iniciado en 1530.

El sucesor de Vesalio en Padua, Realdo Colombo, publicó en 1559 una exitosa *De re anatomica*. Entre los discípulos de Colombo en Roma se contó el español Juan Valverde de Amusco, autor de una *Historia de la composición del cuerpo humano* (1556), cuya versión latina apareció diez años más tarde en Amberes. Las *Vivae imagines partium corporis humani* de Valverde introducen grabados en cobre, una técnica novedosa que permitía una precisión y una finura en las medias tintas imposibles de obtener con las xilografías; la técnica perduró hasta principios del siglo XIX. Colombo y el español rectifican y completan descripciones vesalianas. En esa misma onda debe mencionarse la *Historia anatomica humani corporis* (1600), de André du Laurens, cuyas 26 láminas, espléndidas, están grabadas en cobre.



Los huesos de los pies. Dibujo de Leonardo da Vinci. Windsor, Royal Library, folio 190IIr.

Del siglo XVII deben rescatarse las figuras de Julius Casserius con sus póstumas *Tabulae anatomicae* (1627), que reúne 97 láminas grabadas en cobre, y de Govert Bidloo, cuya *Anatomia humani corporis* (1685) contiene 105 láminas muy originales grabadas en cobre por Peter van Gunst, según dibujos de Gérard de Lairesse. En los años ochenta de ese siglo se desarrolló también la preparación del *Atlas anatómico* de Crisóstomo Martínez, que recoge el espíritu de la época al proponer una interpretación funcional de las estructuras anatómicas.

Precedidas por la *Neurographia* (1685) de Raymond de Vieussens, en la centuria siguiente se asiste a una avalancha de monografías. Así, la *Myotomia reformata* (1724), de William Cowper, la *Osteology* (1728), de Alexander Monro, y, sobre todo, las *Tabulae sceleti et musculorum corporis humani*, impresas en Leyden en 1740, preparadas por Bernhard Siegfrid Weiss (“Albinus”). Se desprende del propio título que estaban consagradas a la osteología y la miología. Otros trabajos reseñables fueron los *Icones anatomicae* (1743-1756) de Albrecht von Haller, *Vasorum lymphaticorum corporis humani historia* (1787), monografía de Paolo Mascagni sobre los vasos linfáticos, y *Tabulae nevrologicae* (1794), de Antonio Scarpa. Sin que esa tendencia suponga abdicar de las anatomías generales de observancia vesaliana, es decir, sin atender a la fisiología; por muestra, la *Exposition anatomique de la structure du corps humain* (1732), de Jacob Benignus Winslow.

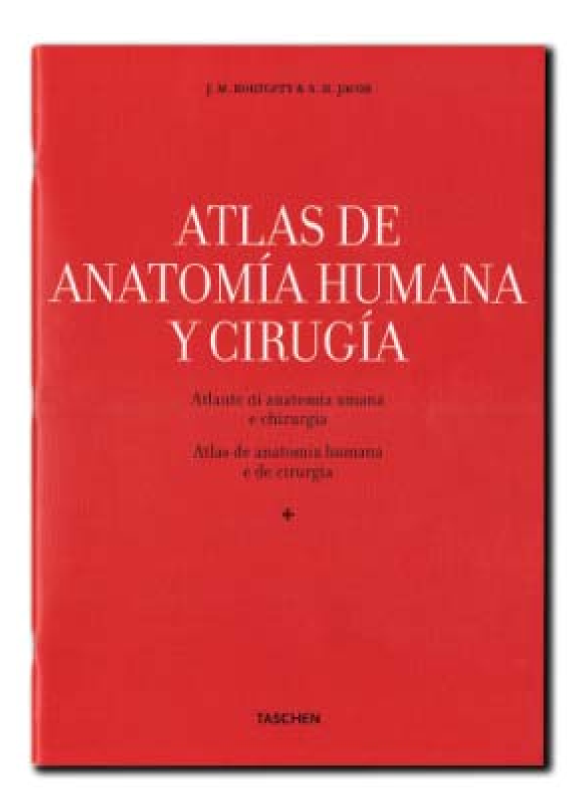
La introducción, en artes gráficas, de la litografía permitirá poner en manos de los médicos, a un precio asequible, atlas anatómicos de cierta ambición. Con ese propósito se presenta el *Traité complet de l’anatomie de l’homme comprenant la médecine opératoire par le Docteur J. M. Bourgery avec planches lithographiées d’après nature par N. H. Jacob*, la obra más acabada de anatomía ilustrada del siglo XIX. Asistimos a otro cambio más profundo, la búsqueda de puentes con la fisiología: “Sin la anatomía, la fisiología no es más que un tejido de fábulas más o menos ingeniosas, la cirugía carece de guía y la medicina se reduce a un empirismo ciego”, declara Bourgery.

Jean Marc Bourgery (1797-1849), natural de Orleans, asistió a los cursos de Jean Baptiste de Lamarck en el Museo de Historia Natural de París, antes de matricularse en la facultad de medicina. Terminada la carrera, ejerció su profesión durante algunos años entre los empleados de fundiciones de cobre en el departamento de Aube, al tiempo que se introducía en el arte de la coloración de la madera. En 1827 volvió a París para doctorarse con una tesis sobre ligaduras circulares de los miembros. Dos años más tarde, publicó un útil *Traité de petite chirurgie*, de cierto éxito.

En 1830, Bourgery inició su proyecto del *Traité complet de l’anatomie de l’homme*, al que dedicaría los años restantes de su vida. Consultó su plan con Georges Cuvier, profesor de historia natural en el Collège de France y de anatomía comparada en el Museo de Historia Natural y, sobre todo, creador de la anatomía comparada y la paleontología de Vertebrados. Cuvier lo aprobó y le animó. La obra constaría de ocho volúmenes: los cinco primeros sobre anatomía descriptiva, el sexto y séptimo sobre anatomía y manual quirúrgicos, y el octavo sobre anatomía general y “filosófica”.

Aunque el trabajo se realizó fuera de las estructuras universitarias y académicas, puertas que siempre encontró cerradas, Bourgery contó con la ayuda de Cuvier, de Constant André Marie Duméril, Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, François Magendie, Henri Ducroy de Blainville y Mateo Orfila. No cayó en la comodidad de compilar la obra ajena. Antes bien, realizó múltiples observaciones personales meticulosas, apoyadas en disecciones y preparaciones anatómicas originales. Una tarea para la que contó con la ayuda de Tessier (miología), L. M. Hirschfeld (anatomía descriptiva) y C. Bernard (tracto olfatorio). La iconografía, láminas litografiadas del natural, corrió a cargo de N. H. Jacob, quien había sido discípulo de Jacques Louis David.

Apareció el tomo primero, sobre osteología y artrología, en el curso del bienio 1831-1832. El tomo segundo, que vio la luz en 1834, está consagrado también al aparato locomotor o aparato de relación. Abarca una parte dedicada a la miología, donde incorpora músculos que ha descubierto y



somete a crítica, y otra a la aponeurología. Desde 1840, Bourgery envía primero a los *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences de Paris* las aportaciones personales que recogerá el *Traité*. Sobre el sistema nervioso versa el tomo tercero, impreso en 1844, después del cuarto que, dedicado a la angiología, salido de tiros en 1835-1836, y del tomo quinto, sobre esplacnología, impreso en 1839.

También precedieron al tomo tercero los tomos sexto y séptimo, sobre anatomía quirúrgica. En esos años de 1839 y 1840 el método clínico-anatómico se encontraba en su apogeo, coyuntura que se refleja en varias láminas, relacionadas directamente con elementos de anatomía patológica. En 1854, años después de la muerte del autor, apareció el tomo octavo, que expone la anatomía general y filosófica. Tiene un aspecto heterogéneo e inacabado. “Lo que me propongo es plasmar, desde el punto de vista general del médico filósofo, el cuadro de la historia de la vida, con sus diversas modificaciones de salud y enfermedad, tal como me parece que se deduce de los recientes progresos de la ciencia de la organización.” Bourgery define la anatomía general como el estudio especial de los tejidos, y la anatomía filosófica como la historia de las modificaciones que experimenta la forma animal bajo la influencia de las causas físicas y morales.

—LUIS ALONSO

Optica medieval

KITĀB AL-MANĀẒIR (*THE OPTICS*) OF AL-ḤASAN IBN AL-HAYTHAM. BOOKS IV-V. ON REFLECTION, AND IMAGES SEEN BY REFLECTION, por Ibn al-Haytham, al-Ḥasan, vol. 1 (24 págs. en inglés + 22* págs. de la introducción en árabe + 402 págs. de la edición del texto árabe): Text, Introductions, Concordance Tables. Vol. II (297 págs. en árabe): Apparatus, Diagrams, Appendices, Analytical Index, Plates. Dirigido por Abdelhamid I. Sabra. The National Council for Culture, Arts and Letters; Kuwait, 2002.

Estos dos volúmenes constituyen la continuación de una enorme tarea iniciada por A. I. Sabra, de la Universidad de Harvard, en 1983, con la publicación, en Kuwait, de una edición crítica de los tres primeros libros del *Kitāb al-Manāẓir* ("Optica") de Ibn al-Haytham, conocido en la tradición europea como Alhacén (965-c. 1040). A la mencionada publicación le siguió (Londres, 1989) una traducción inglesa con su correspondiente comentario de los tres libros citados. El profesor Sabra ha dedicado una gran parte de su labor de investigación a la figura de Ibn al-Haytham, no limitándose a sus trabajos de carácter óptico (cf., por ejemplo, Sabra, *Optics, Astronomy and Logic,* Variorum; Aldershot, 1994). En este campo un egipcio como Sabra (que nunca ha querido adquirir la nacionalidad norteamericana, a pesar de haber vivido en Estados Unidos durante la parte más productiva de su vida) ha sido el gran continuador de otro famoso erudito egipcio, Muṣṭafà Naẓīf, autor de dos brillantes volúmenes centrados en la *Optica* de Ibn al-Haytham (Cairo, 1942-43) que constituyen el inicio de la investigación seria y detallada en torno a la obra de este gran autor, de origen iraquí aunque afincado en Egipto, que fue, sin duda, el óptico más importante de toda la Edad Media.

Tenemos aquí una edición crítica de los libros 4 y 5, acompañada por introducciones textuales, apéndices e índices. Tendremos aún que esperar hasta disponer de la edición de los dos libros restantes (6 y 7), así como para poder leer una traducción inglesa, acompañada por el correspondiente comentario, del conjunto de la obra. La introducción textual aparece, en árabe, en las págs. 3*-20* (cifras orientales) del volumen 1, aunque podemos leer un resumen en inglés en las págs. 5-9 (cifras occidentales) del mismo volumen. Para comprender las dificultades que plantea preparar una edición de este tipo, basta con señalar que Sabra ha utilizado tres manuscritos, conservados en bibliotecas de Estambul, de los que sólo dos contienen el texto íntegro de los dos libros, pero no los diagramas geométricos que Ibn al-Haytham incluye en su libro 5. La totalidad de estos diagramas no aparece en el tercer manuscrito, que, como hemos dicho, es incompleto. Por esta razón, Sabra ha recuperado los dibujos que faltaban a partir del *Tanqīḥ al-Manāzir* ("Revisión de la Optica") de Kamāl al-Dīn al-Fārisī (m. 1319). Existe asimismo una traducción latina medieval atribuida a Gerardo de Cremona, impresa por Risner en Basilea, 1572, y conservada en multitud de manuscritos, pero no sirve, en este caso, de gran ayuda ya que el texto latino de los libros 4-5 (no sucede lo mismo con los libros 1-3) no parece ser una traducción, sino más bien un comentario que contiene numerosos diagramas que no parecen relacionarse con el texto árabe de Ibn al-Haytham.

El *Tanqīḥ* ha sido una gran ayuda para Sabra, quien ha utilizado, en su edición del texto de Ibn al-Haytham, la clasificación elaborada por Kamāl al-Dīn de los pasajes de Alhacén: el comentarista distingue entre *mabāḥith* (investigaciones) y *maqāsid* (proposiciones). Esto facilita la lectura del texto de Ibn al-Haytham, que tiene muy pocas subdivisiones. Sabra ha editado, por último, la descripción, elaborada por Kamāl al-Dīn, del instrumento diseñado por Ibn al-Haytham para medir reflexiones en espejos planos, esféricos, cilíndricos y cónicos. Esto resulta extraordinariamente útil, ya que Ibn al-Haytham no consideró necesario incluir un diagrama del instrumento, que sí aparece en el comentario de Kamāl al-Dīn. El instrumento mencionado recibe el nombre de *ālat al-i^{c}tibār* (instrumento para experimentar) y resulta interesante señalar que la larga descripción del método para construirlo y utilizarlo va seguida, en el texto de Ibn al-Haytham (libro 4), por una formulación completa de las leyes de la reflexión, que parece ser el resultado de la "experimentación" (*i^{c}tibār*)*,* aunque no se describen experimentos detallados relacionados con este tema.

Esta parte es, en mi opinión, una de las más interesantes del libro 4, a la que hay que añadir, en el libro 5, el análisis detallado del llamado "problema de Alhacén", en el que Ibn al-Haytham demuestra su competencia como matemático que conoce muy bien las *Cónicas* de Apolonio: utilizando la formulación del propio Sabra, el problema consiste en hallar la posición del punto de reflexión sobre la superficie de un espejo esférico convexo, dadas las posiciones del ojo y del objeto reflejado. El problema se resuelve también para espejos esféricos cóncavos y para espejos cilíndricos y cónicos, tanto cóncavos como convexos.

Resulta interesante señalar que Ibn al-Haytham es uno de los escasos autores que vivieron en la segunda mitad del siglo X o principios del XI cuya obra fue conocida en al-Andalus y resultó luego, gracias a las traducciones árabo-latinas, accesible a los científicos europeos. La causa de este fenómeno fue la desconexión con Oriente que tuvo lugar en al-Andalus después de la muerte del califa al-Ḥakam II (976). Probablemente la *Optica* de Ibn al-Haytham llegó a al-Andalus dado el interés que sentía por ella el gran rey-matemático de Zaragoza al-Mu'taman ibn Hūd (r. 1081-85). Los estudios recientes sobre la obra matemática de este monarca han dado lugar a un resultado sorprendente en relación, precisamente, con el "problema de Alhacén": Ibn al-Haytham resuelve este problema recurriendo a dos lemas *(muqaddimāt)* geométricos. En 1942-43, Naẓīf demostró que los dos lemas se podían reducir a uno solo y simplificar la solución de Ibn al-Haytham, siendo seguido, a este respecto, por Sabra en trabajos publicados en 1972 y 1982. El texto de al-Mu'taman era desconocido entonces. Hogendijk ha demostrado que el matemático zaragozano descubrió la misma simplificación a la que se refería Naẓīf a fines del siglo XI.

—JULIO SAMSÓ

EN EL PROXIMO NUMERO... ...DE FEBRERO 2007



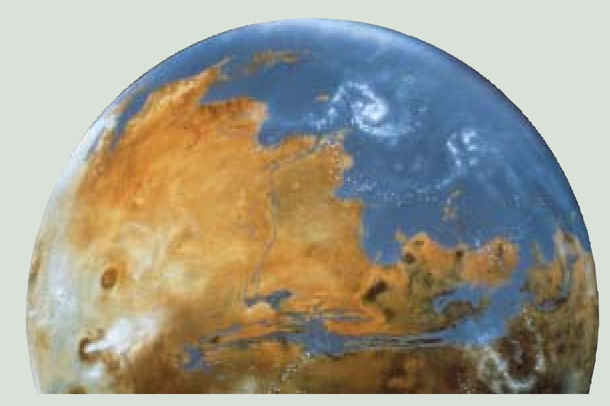


LA PROGENIE DE LUCY, por Kate Wong

El descubrimiento de un nuevo fósil humano reaviva el debate sobre la evolución de la marcha erguida.

ONCOLOGIA CANINA, por David J. Waters y Kathleen Wildasin

El estudio del cáncer en perros ofrece una ayuda única en la lucha contra la versión humana de la enfermedad, al tiempo que supone una mejora en el cuidado de estos animales domésticos.



AGUA EN MARTE, por Jim Bell

Nuevas observaciones indican que agua líquida cubrió buena parte de la superficie del planeta rojo, quizá durante miles de millones de años.

LUZ SUPERCONTINUA, por Robert R. Alfano

La luz de láser supercontinua mide frecuencias y tiempos con máxima precisión. Podría gobernar la transmisión óptica de datos a velocidades nunca igualadas.

ASUNTOS DE PESO, por Ian Robinson

Hace más de un siglo que viene definiéndose el kilogramo, la unidad fundamental de masa, a partir de un cilindro metálico. Ha llegado el momento de sustituir este artefacto por un patrón más preciso basado en una propiedad invariante de la naturaleza.

